



João Daniel Araújo Guerreiro

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Avaliação do efeito combinado de
temperatura, tempo de repouso e pressão
de injeção na eficiência de injeção de
*grouts***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,
Professor Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ildi Cismasiu
Arguente: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar
Vogal: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2014

‘Copyright’ João Daniel Araújo Guerreiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques por me ter proporcionado a oportunidade de realizar a presente dissertação, pelos ensinamentos transmitidos no âmbito deste trabalho e pela referência de conhecimento e competência que constituiu durante todo o percurso académico.

Um especial agradecimento ao Mestre Fernando Jorne por todo o apoio, disponibilidade para esclarecimento de dúvidas e partilha de conhecimento.

Quero também agradecer ao Engenheiro Vítor Silva o apoio no laboratório, e aos colegas que me ajudaram na realização dos ensaios experimentais, principalmente ao António Frade, à Ana Coutinho e ao Fernando Oliveira.

Gostaria igualmente de agradecer aos meus amigos e colegas de mestrado com os quais tive o prazer de conviver, estudar e evoluir a nível pessoal e intelectual.

Por fim, e mais importante, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Mafalda e José, e ao meu irmão Luís, pelo apoio incondicional prestado a todos os níveis durante todo o percurso académico, tal como sempre o fizeram ao longo da minha vida. Uma palavra especial também para a minha avó Olívia por todo o carinho, e para o meu avô António que apesar de ter partido durante o percorrer destes estudos, nunca deixará a minha memória.

Preâmbulo

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do projecto de investigação Optimização de caldas para consolidação de alvenarias (PTDC/ECM/104376/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência, integrando-se no trabalho desenvolvido pela equipa de investigação coordenada pelo orientador desta dissertação, à qual o autor se juntou no período em que a esteve a preparar. Por essa razão a dissertação usa metodologias e conhecimentos desenvolvidos anteriormente no desenrolar do projecto e que em alguns casos não foram ainda publicados ou aguardam aceitação nas revistas a que foram submetidos.

Os diferentes horizontes temporais em que se desenvolvem as várias acções que integram o projecto, designadamente as teses de doutoramento em curso, as dissertações de mestrado já terminadas e a conclusão do próprio projecto, levam a que esta situação de utilização de conhecimentos, metodologias e informação ainda não publicados não seja condicionada, sob pena de inviabilizar a conclusão dos trabalhos cujo âmbito ou duração sejam mais reduzidos. Daí decorre que muita informação não publicada utilizada nesta dissertação seja propriedade intelectual de membros individuais da equipa ou da equipa de investigação em geral. Para clarificação do assunto e para além desta nota, foi utilizada a figura da comunicação particular para referenciar alguma dessa informação, sem prejuízo de existirem situações que possam não estar totalmente identificadas.

Resumo

Na maioria dos monumentos e edifícios que constituem os centros históricos e urbanos, não só em Portugal, como também noutras cidades europeias, as paredes são em alvenaria. Actualmente, grande parte destas construções em alvenaria apresenta danos estruturais, pelo que devido ao seu valor patrimonial, cultural e arquitectónico, devem ser alvo de especial atenção para sua conservação.

O presente trabalho incide sobre uma das técnicas que tem sido considerada mais adequada para restabelecer a homogeneidade, uniformidade de tensões e continuidade dos panos de alvenaria antiga: a injeção de *grouts* (caldas). A injeção de *grouts* tem dois objectivos principais, sendo o primeiro o preenchimento dos vazios e fendas existentes, no sentido de aumentar a compacidade da alvenaria e, conseqüentemente, a resistência à flexão, à compressão e ao corte. O segundo objectivo tem por base a criação de ligações entre dois ou mais panos de uma alvenaria, o que é fundamental no caso de ligações defeituosas entre os panos, incrementado o comportamento monolítico da alvenaria.

A realização de injeções de *grout* em edifícios históricos deve ter em conta a compatibilidade com os materiais existentes. Por isso, neste estudo foi escolhido um *grout* à base de cal hidráulica, devido à maior proximidade física, mecânica e química com os materiais de alvenarias antigas.

O *grout* deve ser concebido de forma a obter o melhor desempenho, quer do ponto de vista da injectabilidade, quer de durabilidade. Torna-se então fundamental adquirir um conhecimento sobre os parâmetros que influenciam as propriedades do *grout* no que respeita ao momento de injeção, como também da compacidade que adquire após inserido no interior do meio poroso. Neste sentido no presente trabalho abordam-se parâmetros como a temperatura e a pressão a que o *grout* é injectado, e o tempo (de repouso) desde o momento da preparação do *grout* até à sua injeção. De forma a aumentar a compacidade e resistência mecânica da alvenaria a ser injectada por *grout*, procura-se avaliar o efeito da presença de diferentes quantidades de sílica de fumo na composição do *grout*.

Com o intuito de estudar os parâmetros descritos analisaram-se modelos injectados com *grout* de forma a simular injeções de *grout* realizadas no pano interior de alvenarias antigas de pedra constituídas por três panos. No sentido de avaliar a qualidade destas injeções de *grouts* recorreu-se ao ensaio de ultra-sons e à tomografia ultra-sónica. A combinação destas técnicas de análise não-destrutivas pode ser aplicada de forma bastante útil na detecção da morfologia interna dos modelos criados, fornecendo uma informação quantitativa e qualitativa sobre a sua compacidade e densidade.

De forma a conferir a viabilidade do ensaio de ultra-sons e da tomografia ultra-sónica, realizaram-se ensaios mecânicos, nomeadamente, o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral e o ensaio de corte, com o intuito de conhecer as resistências mecânicas dos provetes.

Termos-chave: ensaio de ultra-sons, tomografia ultra-sónica, injeção de *grout*, *grout* de cal hidráulica, sílica de fumo, temperatura

Abstract

In most of the monuments and buildings which form the urban and historical centers, not only in Portugal but also in other European cities, the walls are made of masonry. Currently, most of these masonry constructions show some structural damages, and due to its heritage, cultural and architectural value, should be given some special attention in order to preserve them properly.

This paper focuses on one of the techniques which has been considered as the most appropriate one to enhance the homogeneity, uniformity of strength and cohesion of ancient masonry walls: grout injection. There are two main aims in grout injection. The first one is to fill the voids and cracks in order to increase the masonry compactness and, therefore, improve shear, flexural and compressive resistances. The second objective is based on the creation of links between multi-leaves masonries, which is critical in cases of faulty linkage between the internal and external leaves, therefore improving the masonry monolithic behaviour.

When performing grout injections in historical buildings, the compatibility between the existing materials should be taken into account. Thus, was chosen in this study a hydraulic lime based grout, due to its greater physical, mechanical and chemical proximity with ancient masonry materials.

The grout should be designed in order to obtain the best performance, both in terms of injectability and durability. It becomes absolutely essential to acquire some knowledge about the parameters which influence the grout properties, namely at the moment of injection as well as on the compactness acquired after the injection into the porous media. Thereby, the present work addresses parameters such as temperature and the pressure value to which the grout is injected, as well as the resting time between the moment of the grout's preparation to its injection. In order to increase the compactness and the mechanical resistance of the masonry which will be grout injected, the effect of the presence of different amounts of silica fume in its composition should be properly evaluated.

To acquire some more knowledge on these parameters, simplified grout injected models were analysed, in order to simulate, with the highest possible reliability, grout injection in the interior leaf of ancient multi-leaves stone masonries. Ultrasonic testing and ultrasonic tomography were used to assess the quality of these grout injections. The combination of these non-destructive techniques can be applied in a very useful way to detect the internal morphology of the models created, providing quantitative and qualitative information about its compactness and density.

To check the feasibility of ultrasonic testing and ultrasonic tomography, mechanical tests were carried out, namely splitting tensile strength test and shear test, in order to know the mechanical resistance of the specimens.

Keywords: ultrasonic test, ultrasonic tomography, grout injection, hydraulic lime grout, silica fume, temperature

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO.....	5
2.1. Injecção de <i>grout</i>	5
2.1.1. <i>Grout</i>	5
2.1.2. Condições para uma injeção eficaz.....	6
2.2. Reologia	7
2.2.1. Comportamento reológico do <i>grout</i> de injeção	8
2.2.2. Influência da variável tempo de repouso na reologia	9
2.2.3. Influência da temperatura nas propriedades reológicas.....	10
2.2.4. Efeito da pressão de injeção	12
2.3. Adjuvantes e adições	13
2.3.1. Superplastificantes.....	13
2.3.2. Sílica de fumo.....	14
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL DE INJEÇÃO DE <i>GROUT</i> EM PROVETES.....	17
3.1. Materiais estudados	17
3.1.1. Composição do <i>grout</i>	17
3.1.2. Areia.....	19
3.2. Método de injeção	21
3.3. Amostras para a injeção com <i>grout</i>	23
3.3.1. Amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f.....	23
3.3.1.1. <i>Grout</i> 0%SF	23
3.3.1.2. <i>Grout</i> 2,5%SF	24
3.3.1.3. <i>Grout</i> 5%SF	24
3.3.1.4. <i>Grout</i> 10%SF	24
3.3.2. Amostras com meio poroso 40G/40M/20F	25
3.4. Processo de cura das amostras.....	25
4. AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRA-SONS E DE ENSAIOS MECÂNICOS.....	27
4.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	27
4.1.1. No provete inteiro.....	29
4.1.2. Nas fatias	30
4.2. Ensaios mecânicos.....	31
4.2.1. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	32

4.2.2.	Ensaio de resistência ao corte	34
4.3.	Análise de resultados do provete inteiro	35
4.3.1.	<i>Grout</i> 0%SF.....	35
4.3.1.1.	Efeito da temperatura de injeção	35
4.3.1.2.	Efeito da pressão de injeção	39
4.3.1.3.	Efeito do tempo de repouso do <i>grout</i>	41
4.3.2.	<i>Grout</i> 2,5%SF, <i>Grout</i> 5%SF e <i>Grout</i> 10%SF	43
4.3.3.	Comparação com meio poroso 40G/40M/20F	44
4.4.	Análise de resultados das fatias	45
4.4.1.	<i>Grout</i> 0%SF.....	45
4.4.1.1.	Efeito da temperatura de injeção	45
4.4.1.2.	Efeito da pressão de injeção	49
4.4.1.3.	Efeito do tempo de repouso do <i>grout</i>	50
4.4.2.	<i>Grout</i> 10%SF.....	52
4.4.3.	Comparar os diferentes <i>grouts</i>	54
4.4.4.	Comparar diferentes granulometrias	57
4.5.	Análise complementar de resultados das fatias	58
4.6.	Notas sobre os resultados de resistência à tracção por compressão diametral	61
5.	TOMOGRAFIA ULTRA-SÓNICA	65
5.1.	Introdução.....	65
5.2.	Procedimento.....	65
5.2.1.	Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	65
5.2.2.	<i>Software</i>	66
5.2.3.	Métodos e algoritmos	72
5.3.	Análise de resultados.....	73
5.3.1.	<i>Grout</i> 0%SF.....	73
5.3.1.1.	Efeito da temperatura	73
5.3.1.2.	Efeito da pressão	79
5.3.1.3.	Efeito do tempo de repouso do <i>grout</i>	83
5.3.2.	<i>Grout</i> 2,5%SF, <i>Grout</i> 5%SF e <i>Grout</i> 10%SF	87
5.3.3.	Comparação com meio poroso 40G/40M/20F	87
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
6.1.	Conclusões	89
6.2.	Desenvolvimentos futuros	93
	BIBLIOGRAFIA	95
	ANEXOS	101

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade das caldas de injeção	7
Quadro 3.1 – Características da cal hidráulica HL5.....	17
Quadro 3.2 – Características do superplastificante	18
Quadro 3.3 – Características da sílica de fumo	18
Quadro 3.4 – Composição dos diferentes <i>grouts</i> de injeção.....	19
Quadro 3.5 – Tensão de resistência à compressão dos <i>grouts</i> em estudo	19
Quadro 3.6 – Tamanho das partículas de areia.....	19
Quadro 3.7 – Meios porosos em estudo	20
Quadro 3.8 – Características dos meios porosos	21
Quadro 3.9 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com <i>grout</i> 0%SF	23
Quadro 3.10 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com <i>grout</i> 2,5%SF	24
Quadro 3.11 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com <i>grout</i> 5%SF	24
Quadro 3.12 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com <i>grout</i> 10%SF	24
Quadro 3.13 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/20F injectadas com <i>grout</i> 0%SF	25
Quadro 4.1 – $G_{0\%;1\text{bar};0\text{min}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	46
Quadro 4.2 – $G_{0\%;0,5\text{bar};0\text{min}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	47
Quadro 4.3 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	48
Quadro 4.4 – $G_{0\%;0\text{min};5^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	49
Quadro 4.5 – $G_{0\%;0\text{min};20^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	49
Quadro 4.6 – $G_{0\%;0\text{min};40^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	50
Quadro 4.7 – $G_{0\%;1\text{bar};5^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	51

Quadro 4.8 – $G_{0\%;1\text{bar};20^{\circ}\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	51
Quadro 4.9 – $G_{0\%;1\text{bar};40^{\circ}\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	52
Quadro 4.10 – $G_{10\%;1\text{bar};0\text{min}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	53
Quadro 4.11 – $G_{10\%}$: Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral das fatias da base da totalidade das amostras com <i>Grout</i> 10%SF.....	54
Quadro 4.12 – $G_{1\text{bar};0\text{min};20^{\circ}\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	55
Quadro 4.13 – $G_{1\text{bar};0\text{min};5^{\circ}\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	56
Quadro 4.14 – $G_{1\text{bar};0\text{min};40^{\circ}\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	57
Quadro 4.15 – $G_{0\%\text{SF};1\text{bar};0\text{min};20^{\circ}\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral	58

Índice de figuras

Figura 2.1 – Injecção de <i>grout</i> em alvenaria	5
Figura 2.2 – Representação do efeito da injecção de <i>grouts</i> com maior e menor viscosidade plástica	8
Figura 2.3 – Efeito da temperatura na tensão de cedência (“Yield stress”) e viscosidade plástica (“Plastic viscosity”) de um <i>grout</i> de cal hidráulica com SF=2.5% e SP=1.2%	10
Figura 2.4 – Injectabilidade de um <i>grout</i> de cal hidráulica com SF=2% e SP=0,8% para diferentes temperaturas.....	11
Figura 2.5 – Efeito da pressão na tensão de cedência (“Yield stress”) e viscosidade plástica (“Plastic viscosity”) de um <i>grout</i> de cal hidráulica com SF=2% e SP=0,8%	12
Figura 2.6 – Esquema representativo do mecanismo de acção do superplastificante sobre as partículas de <i>grout</i>	14
Figura 2.7 – Imagens de microscópio electrónico com 7 dias no estado endurecido: de um <i>grout</i> sem aditivos a 5000x (esq.) e de um <i>grout</i> com 10% de sílica de fumo a 3000x (dir.)	15
Figura 3.1 – Diferentes tamanhos das partículas de areia (Grosso, médio, fino e mais fino)	20
Figura 3.2 – Curva granulometria dos diferentes tamanhos das partículas de areia.....	20
Figura 3.3 – Curva granulométrica dos diferentes meios porosos	21
Figura 3.4 – Esquema representativo do método de injecção	22
Figura 3.5 – Modelo real do método de injecção	22
Figura 4.1 – Medição efectuada em provete inteiro	28
Figura 4.2 – Medição efectuada numa fatia	28
Figura 4.3 – Malha de ensaio de ultra-sons de provete inteiro: vista de topo (esq.) e corte 1-1’ (dir.)	29
Figura 4.4 – Esquema de localização dos cortes efectuados nos provetes	30
Figura 4.5 – Corte de provete.....	30
Figura 4.6 – Esq.: Vista de topo da malha pentagonal utilizada em cada fatia; Dir.: Vista lateral do posicionamento intermédio da malha na altura de cada fatia	31
Figura 4.7 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	32
Figura 4.8 – Esq.: Medição do diâmetro da fatia; Dir.: Medição da espessura da fatia	32
Figura 4.9 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	33
Figura 4.10 – Aspecto de uma fatia de uma amostra após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	33
Figura 4.11 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de corte.....	34
Figura 4.12 – Aspecto de uma fatia de uma amostra após um ensaio de corte	35

Figura 4.13 – $G_{0\%;1\text{bar};0\text{min}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	36
Figura 4.14 – $G_{0\%;0,5\text{bar};0\text{min}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	36
Figura 4.15 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	38
Figura 4.16 – Influência da temperatura na injectabilidade do <i>grout</i>	38
Figura 4.17 – Influência da temperatura e do tempo de repouso na área de flocculação do <i>grout</i>	39
Figura 4.18 – $G_{0\%;0\text{min};5^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	40
Figura 4.19 – $G_{0\%;0\text{min};20^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	40
Figura 4.20 – $G_{0\%;0\text{min};40^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	40
Figura 4.21 – $G_{0\%;1\text{bar};5^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	41
Figura 4.22 – $G_{0\%;1\text{bar};20^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	42
Figura 4.23 – $G_{0\%;1\text{bar};40^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	42
Figura 4.24 – Amostra com <i>grout</i> com sílica de fumo em que ocorre injeção parcial devido a bloqueio: Vista de perfil (esq.) e vista superior (dir.)	43
Figura 4.25 – Formação de aglomerado flocular: na entrada do vazio (1), no interior do vazio (2)	44
Figura 4.26 – $G_{0\%;0\text{min};20^{\circ}\text{C}}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]	44
Figura 4.27 – $G_{0\%;1\text{bar};0\text{min}}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]	59
Figura 4.28 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min}}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]	59
Figura 4.29 – $G_{0\%;1\text{bar};5^{\circ}\text{C}}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]	60
Figura 4.30 – $G_{0\%;1\text{bar};20^{\circ}\text{C}}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]	60
Figura 4.31 – $G_{0\%;1\text{bar};40^{\circ}\text{C}}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]	60
Figura 4.32 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes temperaturas de injeção, 20°C vs. 5°C: <i>Grout</i> 0%SF (esq.) <i>Grout</i> 10%SF (dir.)	61
Figura 4.33 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes temperaturas de injeção, 20°C vs. 40°C: <i>Grout</i> 0%SF (esq.) <i>Grout</i> 10%SF (dir.)	62
Figura 4.34 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes pressões de injeção: <i>Grout</i> 0%SF - 1 bar vs. 0,5 bar (esq.) <i>Grout</i> 10%SF - 1 bar vs. 2 bar (dir.)	62
Figura 4.35 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes tempos de repouso do <i>grout</i> , 0 min vs. 60 min: <i>Grout</i> 0%SF (esq.) <i>Grout</i> 10%SF (dir.)	63
Figura 5.1 – Sistema de coordenadas adoptado	66
Figura 5.2 – Exemplo de um ficheiro de dados “.3dd” de um provete	67
Figura 5.3 – GEOTOMCG: separador <i>Data</i>	67
Figura 5.4 – GEOTOMCG: separador <i>Model</i>	68
Figura 5.5 – GEOTOMCG: <i>Generate Model</i>	68

Figura 5.6 – GEOTOMCG: separador <i>Options</i>	69
Figura 5.7 – GEOTOMCG: <i>Inversion Parameters</i>	69
Figura 5.8 – GEOTOMCG: separador <i>Run</i>	70
Figura 5.9 – GEOTOMCG: algoritmo iterativo do <i>software</i>	70
Figura 5.10 – GEOTOMCG: <i>Model display</i>	71
Figura 5.11 – Exemplo de tomograma ultra-sónico de um provete obtido com o GEOTOMCG (esq.) e tomograma do mesmo provete melhorado com o SURFER (dir.)	72
Figura 5.12 – $G_{0\%SF;1bar;0min}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 5°C, 20°C e 40°C	74
Figura 5.13 – $G_{0\%;1bar;0min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	75
Figura 5.14 – $G_{0\%;1bar;0min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	75
Figura 5.15 – $G_{0\%;1bar;0min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	76
Figura 5.16 – $G_{0\%SF;0,5bar;0min}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 5°C, 20°C e 40°C	77
Figura 5.17 – $G_{0\%SF;1bar;60min}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 5°C, 20°C e 40°C	78
Figura 5.18 – Fenómenos de filtração do <i>grout</i> no interior de algumas amostras.....	79
Figura 5.19 – $G_{0\%SF;0min;5^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 1 bar e 0,5 bar.....	79
Figura 5.20 – $G_{0\%SF;0min;20^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 1 bar e 0,5 bar.....	80
Figura 5.21 – $G_{0\%;0,5bar;0min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	80
Figura 5.22 – $G_{0\%;0,5bar;0min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	81
Figura 5.23 – $G_{0\%SF;0min;40^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 1 bar e 0,5 bar.....	81
Figura 5.24 – $G_{0\%;0,5bar;0min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	82
Figura 5.25 – $G_{0\%SF;0,5bar;0min;40^{\circ}C}$: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra.....	82
Figura 5.26 – $G_{0\%SF;1bar;5^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 0min e 60min	83
Figura 5.27 – $G_{0\%;1bar;60min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	84

Figura 5.28 – $G_{0\%SF;1bar;20^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 0min e 60min	84
Figura 5.29 – $G_{0\%SF;1bar;40^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 0min e 60min	85
Figura 5.30 – $G_{0\%;1bar;60min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	85
Figura 5.31 – $G_{0\%SF;1bar;60min;20^{\circ}C}$: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra	86
Figura 5.32 – $G_{0\%;1bar;60min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	86
Figura 5.33 – $G_{0\%SF;1bar;60min;40^{\circ}C}$: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra	87
Figura 5.34 – $G_{0\%SF;1bar;0min;20^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas em amostras com diferentes meios porosos.....	88
Figura A.1 – $G_{0\%;1bar;0min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	102
Figura A.2 – $G_{0\%;1bar;0min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	102
Figura A.3 – $G_{0\%;1bar;0min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	102
Figura A.4 – $G_{0\%;1bar;0min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	103
Figura A.5 – $G_{0\%;1bar;0min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	103
Figura A.6 – $G_{0\%;1bar;0min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	103
Figura A.7 – $G_{0\%;0,5bar;0min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	104
Figura A.8 – $G_{0\%;0,5bar;0min;5^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	104
Figura A.9 – $G_{0\%;0,5bar;0min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	104
Figura A.10 – $G_{0\%;0,5bar;0min;20^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	105
Figura A.11 – $G_{0\%;0,5bar;0min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	105
Figura A.12 – $G_{0\%;0,5bar;0min;40^{\circ}C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	105

Figura A.13 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min};5^{\circ}\text{C}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	106
Figura A.14 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min};5^{\circ}\text{C}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	106
Figura A.15 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min};20^{\circ}\text{C}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	106
Figura A.16 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min};20^{\circ}\text{C}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	107
Figura A.17 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min};40^{\circ}\text{C}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	107
Figura A.18 – $G_{0\%;1\text{bar};60\text{min};40^{\circ}\text{C}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	107
Figura A.19 – $G_{40\text{G}/40\text{M}/20\text{F};1\text{bar}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra.....	108
Figura A.20 – $G_{40\text{G}/40\text{M}/20\text{F};1\text{bar}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra.....	108
Figura A.21 – $G_{40\text{G}/40\text{M}/20\text{F};1\text{bar}}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra.....	108

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e enquadramento do tema

Em grande parte dos monumentos e edifícios que constituem os centros históricos e urbanos, não só em Portugal, como também em diversas cidades europeias, as paredes são em alvenaria. A maioria das construções em alvenaria apresenta, hoje, danos estruturais, consequência de uma inexistente manutenção periódica. Os edifícios históricos afiguram-se como casos particularmente importantes devido ao seu valor patrimonial, cultural e arquitectónico e, como tal, devem ser alvo de especial atenção na sua conservação, com técnicas diferentes das utilizadas em construções mais recentes.

Neste sentido, são diversos os tipos de edificações em que surge a necessidade de acções de consolidação realizadas de modo a preservar ou melhorar as características estruturais de alvenarias antigas. O presente trabalho incide sobre uma das técnicas mais utilizadas na consolidação de alvenarias: a injeção de *grouts* (caldas) [19, 38, 53]. Esta técnica tem sido considerada adequada para restabelecer a homogeneidade, uniformidade de tensões e continuidade dos panos de alvenaria antiga. Diversas investigações realizadas nas últimas duas décadas comprovam a sua eficácia [13, 17, 20].

Na reabilitação de edifícios históricos com recurso a injeções de *grout* há que ter em atenção a compatibilidade com os materiais existentes. Segundo Collepari [26], o uso de *grouts* à base de cimento é um exemplo de uma intervenção incorrecta, visto que a interacção do cimento com os materiais pré-existentes pode causar um resultado mais negativo que positivo. Assim, neste estudo a escolha do ligante do *grout* recaiu sobre a cal hidráulica, tendo por base as propriedades físicas, mecânicas e químicas mais próximas com os materiais existentes em alvenarias antigas [15].

A injeção de *grouts* tem dois objectivos principais [37], sendo o primeiro o preenchimento dos vazios e fendas existentes no sentido de aumentar a compacidade da alvenaria e, consequentemente, a resistência à flexão, à compressão e ao corte. O segundo objectivo, tem por base a criação de ligações entre dois ou mais panos de uma alvenaria, o que é fundamental no caso das ligações defeituosas entre os panos, incrementado o comportamento monolítico da alvenaria. Deste modo, reduz-se o risco de colapso frágil, que é frequentemente caracterizado pelo destacamento dos panos exteriores para fora do seu plano [16].

Para alcançar os objectivos descritos anteriormente, o *grout* deve ser concebido para obter o melhor desempenho quer do ponto de vista da injectabilidade, quer de durabilidade. Sendo assim, é necessário acautelar a estabilidade do *grout* e controlar as suas propriedades reológicas, para que a injeção preencha os vazios no interior da alvenaria [7]. No entanto, há que ter em conta factores ambientais, como a temperatura em que é efectuada a injeção, que segundo outros estudos [12, 21], influencia a qualidade de injeção.

Facilmente se compreende que é fundamental adquirir um conhecimento sobre os parâmetros que influenciam as propriedades do *grout* no que respeita ao momento de injeção, como também da compacidade que adquire após inserido no interior do meio poroso. No presente trabalho abordam-se os seguintes parâmetros:

- Composição do *grout*, em que se inclui a presença de superplastificante e a variação da quantidade de sílica de fumo, respectivamente, um adjuvante e uma adição;
- Variações das condições em que a injeção é efectuada, como a temperatura e a pressão, e o tempo desde o momento da preparação do *grout* até à sua injeção.

De referir que a presente dissertação foi elaborada em concomitância com a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne e surge na sequência da realização de injeções de *grouts*, na qual se estudam propriedades do *grout*, variáveis no momento de injeção do *grout* e diferentes composições do meio poroso. Assim, à semelhança de anteriores investigações de outros autores [20, 43, 63], com o intuito de avaliar a penetrabilidade do *grout* no interior do meio poroso, foram realizados por Jorne ensaios de injectabilidade através da criação de modelos de forma a simular, com a maior fiabilidade possível, o pano interior de alvenarias antigas de pedra.

O presente trabalho segue o estudo anteriormente referido e incide na realização de técnicas não destrutivas, especificamente, ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica [61, 66], no sentido de avaliar a qualidade das injeções de *grouts*, com as variações referidas anteriormente, num meio poroso arenoso. A combinação destas técnicas de análise pode ser aplicada de uma forma bastante útil na detecção da morfologia interna dos modelos criados, fornecendo uma informação quantitativa e qualitativa sobre a sua compacidade e densidade [38, 51]. Desta forma, podem ser detectadas áreas de injeção onde o *grout* tem maior dificuldade de penetração, e assim, perceber a influência dos parâmetros em estudo.

Ainda a acrescentar, a realização de ensaios mecânicos, nomeadamente, o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) e o ensaio de corte (*Shear Test*), com o intuito de conhecer as suas resistências mecânicas. Posteriormente comparam-se estes resultados com os ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica, de forma a conferir a eficácia de análise das injeções efectuadas, com recurso a estas técnicas não-destrutivas.

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo principal a avaliação da eficiência de injeção de *grouts* com recurso ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e à tomografia ultra-sónica. Recorrendo a estas técnicas não-destrutivas pretendeu-se analisar em amostras compostas pelo mesmo meio poroso (areia):

- O desempenho do *grout* de cal hidráulica com a adição de sílica de fumo, com diferentes quantidades (0%, 2,5%, 5% e 10%), em conjunto com a existência de superplastificante;
- A influência de variáveis no momento de injeção das amostras, como a temperatura e a pressão exercida, e o tempo de repouso do *grout* antes da injeção.

Para estudar a adequabilidade do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons comparam-se os resultados obtidos com recurso a esta técnica com os resultados provenientes dos ensaios mecânicos, nomeadamente, através da determinação da resistência à tracção por compressão diametral e a resistência a uma acção de corte.

Finalmente pretendeu-se avaliar a fiabilidade da utilização de tomografia ultra-sónica na avaliação da eficácia de injeção de *grouts* em diferentes casos, com recurso a imagens em 2D e 3D.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. Neste capítulo, o primeiro, apresenta-se o enquadramento, os objectivos e a organização do trabalho.

O capítulo 2 consiste numa abordagem teórica inicial sobre os parâmetros em estudo que influenciam a injeção de *grout*: superplastificante (adjuvante), sílica de fumo (adição), e o efeito de diferentes condições em que a injeção é efectuada, nomeadamente, a temperatura, a pressão e o tempo de repouso do *grout*.

No capítulo 3 define-se a metodologia experimental adoptada, caracterizam-se os materiais utilizados e apresenta-se a listagem das amostras a ser analisadas nos capítulos 4 e 5.

No capítulo 4 apresentam-se análises realizadas ao provete inteiro e às fatias com recurso aos resultados obtidos nos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e nos ensaios mecânicos, de resistência à tracção por compressão diametral e de corte.

No capítulo 5 é abordada a eficácia da utilização de tomografia ultra-sónica na detecção de descontinuidades no interior das amostras injectadas com *grout*, de forma a verificar os resultados obtidos no capítulo 4.

No capítulo 6, apresentam-se as conclusões finais do trabalho, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros nesta área de estudo.

Por último, apresentam-se a bibliografia e os anexos.

2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO

2.1. Injecção de *grout*

A injecção de *grout* é, entre outras técnicas, um método de consolidação usado para superar a deterioração estrutural. A introdução na alvenaria de um ligante no estado líquido irá preencher as fendas e os vazios visíveis e não visíveis [34], quer sejam os vazios do material de enchimento, ou os vazios entre os elementos de alvenaria e o material de enchimento. Quando é possível um bom preenchimento das aberturas ou fendas, e principalmente, uma boa ligação entre todos os constituintes, a capacidade de carga do edifício melhora significativamente após o endurecimento do *grout* introduzido. A alvenaria recupera o seu comportamento monolítico e a sua resistência mecânica global aumenta [34]. Trata-se de uma técnica de reforço irreversível e “passiva”, pois não engloba operações que alterem o equilíbrio de forças de imediato. O aspecto original exterior das paredes é respeitado, pelo que é uma solução frequentemente utilizada em edifícios de reconhecido valor histórico e/ou arquitectónico, sempre que seja necessário intervir e preservar o aspecto original [15, 16].



Figura 2.1 – Injecção de *grout* em alvenaria [19]

2.1.1. *Grout*

Toumbakari propõe a seguinte definição: “Uma calda ou *grout* de injecção é uma argamassa utilizada no preenchimento, homogeneização, consolidação e/ou melhoria das propriedades mecânicas de sistemas que apresentem cavidades, vazios, fendas ou falta de coesão ou de sistemas totalmente não coesos” [58]. Esta definição deixa em aberto a opção de escolha dos materiais constituintes das misturas bem como as suas propriedades, quer no estado fresco, quer no estado endurecido, para cada situação particular.

Numa visão mais concreta pode definir-se o *grout* como uma suspensão aquosa constituída por ligante, água e adjuvantes, e ainda possivelmente, adições. Deve ter como características reduzida

viscosidade e alta penetrabilidade. As especificações do *grout* envolvem um conhecimento sobre a capacidade de escoamento dentro do núcleo da alvenaria e a compatibilidade física e química com os materiais originais presentes nas edificações históricas [40]. Não obstante, as propriedades do *grout* são afectadas por diversos parâmetros, que incluem o tipo de ligante e a composição, procedimento de mistura, tipo e dosagem de adjuvantes e adições, e condições ambientais, como a temperatura que pode alterar a capacidade de injeção do *grout* [10].

Um dos principais critérios para escolha do ligante na avaliação e estudo da composição do *grout* é a avaliação de potenciais problemas de incompatibilidade com os materiais originais constituintes das paredes. Segundo alguns autores [22, 60], ligantes de cal hidráulica proporcionam *grouts* potencialmente mais compatíveis, devido a maior proximidade das propriedades químicas, físicas e mecânicas com os materiais antigos, quando comparados com aqueles à base de cimento puro ou resinas orgânicas, melhorando assim a durabilidade.

O endurecimento da cal hidráulica compreende duas reacções. Na primeira reacção dá-se a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, quer na água quer no ar. Na segunda reacção dá-se a recarbonatação da cal apagada, só ao ar e em presença do dióxido de carbono.

2.1.2. Condições para uma injeção eficaz

A qualidade de uma injeção é avaliada do ponto de vista da injectabilidade do *grout*, que traduz a capacidade de escoamento da mistura e de manutenção dessa característica por um período de tempo que permita uma injeção fácil e eficiente do elemento injectado. A eficácia de uma injeção de *grout* depende não só das características da mistura, mas também do conhecimento do tipo de parede [60]. Portanto, o poder de penetração do *grout* depende de diversos factores quer de carácter intrínseco (por exemplo a granulometria da componente sólida da mistura), quer de carácter extrínseco como a morfologia do suporte (absorção/adsorção) e dos seus materiais constituintes (granulometria, superfície específica).

O fracasso desta técnica de consolidação pode ocorrer nas seguintes situações [21]:

- Se o meio injectado apresentar heterogeneidade na resistência e rigidez;
- Se existir fraca penetração e difusão do *grout*, devido a dificuldades na injectabilidade ou na técnica de injeção;
- Devido a fenómenos de segregação e/ou retracção do *grout*;
- Se existir incompatibilidades físicas e químicas entre o *grout* injectado e os materiais originais da alvenaria.

Portanto, a qualidade da consolidação depende tanto das características dos materiais da alvenaria, como do comportamento do *grout*. As propriedades do *grout* no estado fresco parecem ser tão importantes como as propriedades no estado endurecido, visto que a consistência do *grout* é uma

característica essencial para que exista um eficaz preenchimento dos vazios da alvenaria. Deste modo, a optimização da injeção do *grout* é uma tarefa da maior importância.

Define-se de seguida, no quadro 2.1, as principais propriedades para a caracterização dos *grouts* de injeção e que devem ser consideradas para garantir a eficiência desta técnica [15, 50]

Quadro 2.1 – Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade das caldas de injeção [15, 50]

Requisitos Reológicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme, de modo que todos os vazios sejam preenchidos de igual forma (injectabilidade – propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.); ➤ Resistência à segregação (para evitar heterogeneidades); ➤ A exsudação deve ser mínima, para diminuir a presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido.
Requisitos Químicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Deverá ter características químicas estáveis no tempo, ou seja, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reacções irreversíveis; ➤ Deverá ser resistente aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências.
Requisitos Físicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O tempo de início de presa deverá ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção; ➤ As propriedades higroscópicas deverão ser: insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade; ➤ Pretende-se que a calda tenha uma retracção baixa.
Requisitos Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ As características de resistência mecânica e, essencialmente, de rigidez deverão ser similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores; ➤ As caldas e argamassas deverão ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto.

2.2. Reologia

Por definição, a reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais (Bingham, 1929).

A reologia influencia parâmetros relacionados com a aplicação do *grout*, tais como: facilidade de injeção, estabilidade, durabilidade e desenvolvimento de resistências mecânicas. Ou seja, o comportamento reológico do *grout* está relacionado com as suas propriedades no estado fresco. Consequentemente, a reologia destes materiais deve ser compreendida e controlada, de modo a que possam ser bombeados e fluam no meio poroso onde estão a ser injectados.

2.2.1. Comportamento reológico do *grout* de injeção

A optimização da injeção do *grout* implica um controlo adequado das propriedades associadas ao comportamento reológico, da capacidade de retenção de água, da segregação/exsudação, entre outras, que permitem o escoamento mais fácil do *grout* no meio poroso. Deste modo, procura-se evitar uma perda excessiva da sua água de constituição em consequência da absorção por capilaridade.

Assim, basicamente, a concepção de um *grout* de injeção pressupõe a verificação *a priori* da capacidade de fluir e preencher o meio poroso onde for injectada, e da composição adequada dos materiais que a constituem. Será esta capacidade do *grout* em escoar e preencher o meio poroso onde vai ser inserida, aliada à composição de materiais prescrita, que condicionará a qualidade da consolidação. Do ponto de vista reológico, a avaliação dessa capacidade pressupõe a determinação de pelo menos duas grandezas fundamentais: a tensão de cedência e a viscosidade plástica do *grout* de injeção.

A tensão de cedência ou tensão limite de escoamento pode ser interpretada como a tensão que é necessária exceder para o escoamento se iniciar. De um ponto de vista prático, a tensão de cedência está associada à capacidade de enchimento do *grout* e ao facto de este fluir ou não quando sujeito a uma tensão aplicada. Os valores da tensão de cedência permitem perceber a facilidade com que os *grouts* começam a escoar, uma vez que representam o valor crítico necessário para que tal se verifique.

A viscosidade plástica representa a resistência ao fluxo, uma vez este iniciado. Tal como a tensão de cedência, pode também funcionar como controlo do *grout*, permitindo diferenciar os *grouts* que oferecem grande resistência ao escoamento (difíceis de bombear) dos outros facilmente trabalháveis. Uma viscosidade plástica baixa significa que a suspensão flui facilmente, enquanto que para um valor elevado de viscosidade plástica, que resulta das interacções entre as partículas coloidais excessivas de suspensão, o fluxo será muito mais difícil [10]. A figura 2.2 ilustra o efeito de injeções de *grout* com maior e menor viscosidade plástica.

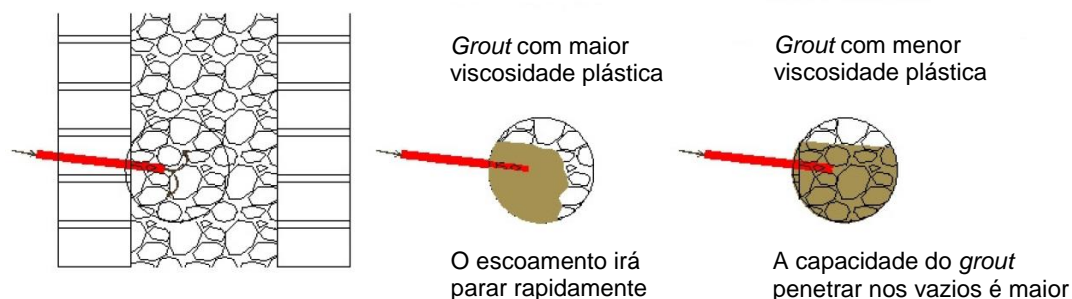


Figura 2.2 – Representação do efeito da injeção de *grouts* com maior e menor viscosidade plástica (adaptado de [19])

Os *grouts* podem ser entendidos como uma suspensão de partículas sólidas num líquido viscoso. O escoamento de *grouts* de injeção com base em ligantes hidráulicos pode ser associado ao

escoamento de um fluido com comportamento tixotrópico. O comportamento tixotrópico é caracterizado pelo decréscimo da viscosidade sobre uma taxa de corte e a recuperação da sua estrutura inicial quando a tensão é removida. Pode-se então constatar que o *grout* é reversível (na óptica da floculação-desfloculação), dado às reacções químicas do ligante ainda não serem significativas no intervalo de tempo caracterizado pelo comportamento tixotrópico.

O desempenho do *grout* de injeção no meio poroso, designadamente a capacidade de preenchimento dos vazios, a segregação, retracção e reacções químicas e físicas entre o *grout* de injeção e os materiais existentes são afectados por determinados parâmetros, incluindo o teor e tipo de ligante, a dosagem e tipo de adjuvante, a relação água/ligante, a temperatura da água, o tempo e sequência da mistura, bem como as condições de cura, particularmente a humidade e temperatura ambiente.

O comportamento de um *grout* constituído unicamente por ligante e água revela-se, em regra, insatisfatório para um adequado desempenho reológico, então, devem ser utilizados adjuvantes na sua composição, tais como superplastificantes. Desta forma, não é necessária a utilização de uma dosagem água/ligante muito elevada [39] para a obtenção de um *grout* com boa fluidez que consequentemente permitisse uma boa injectabilidade.

2.2.2. Influência da variável tempo de repouso na reologia

Outra questão importante na reologia de um *grout* é o comportamento dependente do tempo de repouso, isto é, o comportamento tixotrópico. Isto significa que no caso de um *grout*, a viscosidade depende não só da tensão de corte aplicada, mas também do intervalo de tempo entre a suspensão ser submetida à tensão e a injeção ser efectuada, e ao historial de tensões de corte aplicadas, que resulta num comportamento de histerese. *Grouts* à base de cal hidráulica podem ser considerados materiais tixotrópicos, visto que apresentam um comportamento pseudoplástico e dependente do tempo de repouso, como se constata noutros estudos [7, 11].

Durante a acção de corte sobre o *grout* de cal hidráulica, as ligações mais fracas entre partículas são quebradas devido à acção mecânica e a rede entre estas divide-se em aglomerados separados (desfloculação). Se o *grout* está em repouso, as partículas começam de novo a flocular em aglomerados (re-floculação), que resultam numa perda da trabalhabilidade.

Outros estudos [48, 54] indicam que estas alterações estruturais são dominantes e reversíveis, mas apenas num curto período de tempo, que dependem também da temperatura do *grout*.

2.2.3. Influência da temperatura nas propriedades reológicas

A injeção de *grout* pode ocorrer sob diferentes condições ambientais, que resultam em diferentes desempenhos das injeções de *grout*. É um facto que não é possível alterar a temperatura presente no local de injeção, e por esse motivo ser fundamental compreender a influência desse factor na capacidade de injeção, para perceber as consequências que daí advêm e, possivelmente agendar a injeção de *grout* para a estação do ano mais apropriada.

O gráfico da figura 2.3 [36] apresenta a influência da temperatura nas propriedades reológicas de um *grout*. A evolução dos valores da tensão de cedência e da viscosidade plástica com o aumento da temperatura sugerem que a baixas temperaturas (5°C) pode ocorrer a formação de cristais de gelo [44], resultando em elevadas tensão de cedência e viscosidade plástica. Porém, com o aumento da temperatura, ambos os parâmetros reológicos diminuem como resultado da agitação térmica. Não obstante, para temperaturas acima dos 20°C, esta agitação térmica é anulada por dois factores: como uma reacção cinética mais rápida na hidratação da cal, e o aumento de forças electrostáticas das partículas de cal com a temperatura [33]. Isto está de acordo com as conclusões de Lei e Struble [46]. Estes autores relataram que as interacções entre os aglomerados de ligante são regidas pelos hidratos que crescem nas suas superfícies, que são maiores a temperaturas elevadas. Estas interacções de atracção são mais fortes que as acções de repulsão estabilizantes do superplastificante. Assim, o aumento da temperatura acima dos 20°C resulta num aumento das forças de interacção entre as partículas, o que origina uma floculação da microestrutura, e consequentemente, a perda de trabalhabilidade.

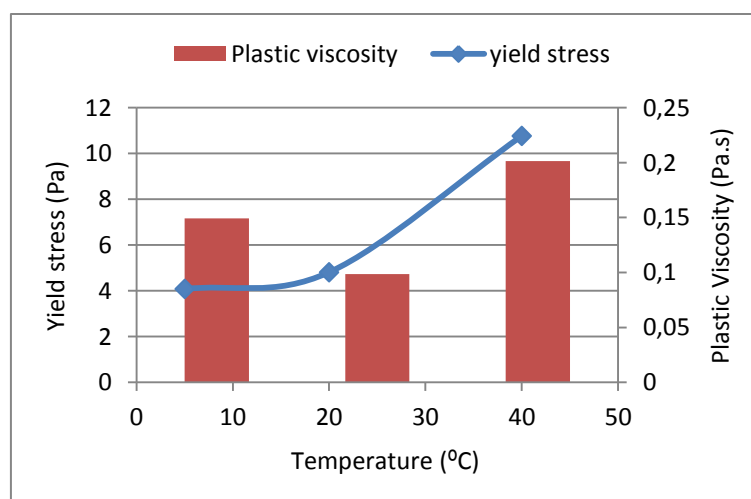


Figura 2.3 – Efeito da temperatura na tensão de cedência (“Yield stress”) e viscosidade plástica (“Plastic viscosity”) de um *grout* de cal hidráulica com SF=2.5% e SP=1.2% [36]

Com base nos resultados obtidos na figura 2.3 pode constatar-se que a temperatura ambiente de 20°C é aquela que apresenta melhor desempenho reológico do *grout*. Este comportamento pode ser

confirmado pelo gráfico da figura 2.4 [12] que prova que a temperatura de 20°C resulta numa melhor fluidez do *grout* em questão e, por consequência numa melhor penetrabilidade no meio poroso. Conclusões semelhantes foram obtidas por Bras *et al.* [21], que obtiveram igualmente um melhor desempenho reológico do *grout* no estado fresco para temperaturas de 20°C, embora sem considerar o uso de superplastificante.

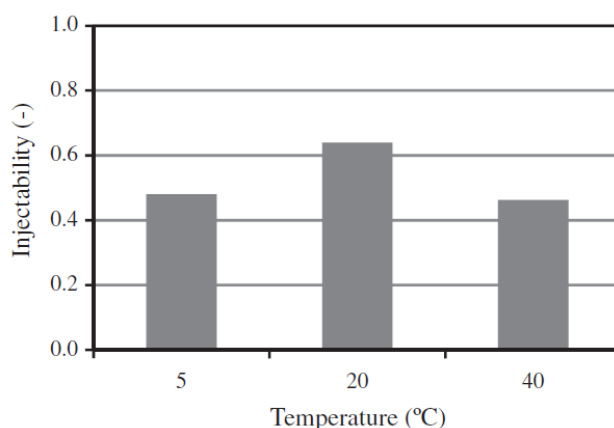


Figura 2.4 – Injectabilidade de um *grout* de cal hidráulica com SF=2% e SP=0,8% para diferentes temperaturas [12]

No que diz respeito à tixotropia do *grout*, alguns autores [33, 65] referem que existem dois factores que podem estar envolvidos no comportamento tixotrópico. O primeiro, que o aumento da temperatura resulta em reacções de hidratação mais rápidas e um maior estado de flocculação. Além disso, o crescimento dos produtos de hidratação na superfície das partículas de ligante irá cobrir as camadas de superplastificante absorvidas, o que causa uma progressiva perda da acção de dispersão do superplastificante. O segundo factor indica que, a baixas temperaturas (como a 5°C), a temperatura do *grout* começa a aproximar-se do ponto de congelamento da água, o que resulta na formação de fortes ligações de hidrogénio. Além disso, a um nível molecular, a temperatura está relacionada com movimentos aleatórios das partículas (movimento Browniano). Isto significa que a baixas temperaturas, a agitação molecular é menor (as partículas de *grout* estão mais próximas entre si), portanto um menor estado de liberdade provoca uma maior flocculação da microestrutura. Ainda a acrescentar, a possibilidade de poder ocorrer, a baixas temperaturas, uma diminuição da intensidade do mecanismo de dispersão das moléculas de superplastificante, originada por mudanças no arranjo espacial do superplastificante absorvido [32].

Resumindo, o efeito da temperatura não é negligenciável para o desempenho do *grout*, nem para o estado fresco, nem para o estado endurecido. Contudo neste trabalho estudou-se apenas o efeito da variável temperatura no momento da injeção, afectando por isso o estado endurecido do *grout* apenas numa fase muito inicial. Portanto, numa injeção de *grout*, uma selecção apropriada da temperatura ambiente, escolhendo a melhor estação do ano para a efectuar, irá contribuir para uma melhoria da capacidade de injeção [10].

2.2.4. Efeito da pressão de injeção

A pressão a que um *grout* é injectado na alvenaria influencia o sucesso da injeção e pode variar consoante a composição do *grout*, principalmente devido ao tamanho e disposição das partículas de *grout*.

O gráfico da figura 2.5 [12] apresenta o efeito da pressão no comportamento reológico de um *grout*, no qual se pode constatar as variações na tensão de cedência e da viscosidade plástica para diferentes valores de pressão de injeção. Como visto anteriormente, um *grout* deve apresentar valores reduzidos para ambas estas grandezas. Analisando o gráfico facilmente se conclui que a pressão ideal seria a menor possível. Porém, não se pode olhar apenas ao aspecto reológico, visto que uma injeção com valores próximos de 0 bar teria uma penetrabilidade nos vazios do meio poroso reduzida ou, em certos casos, mesmo nula.

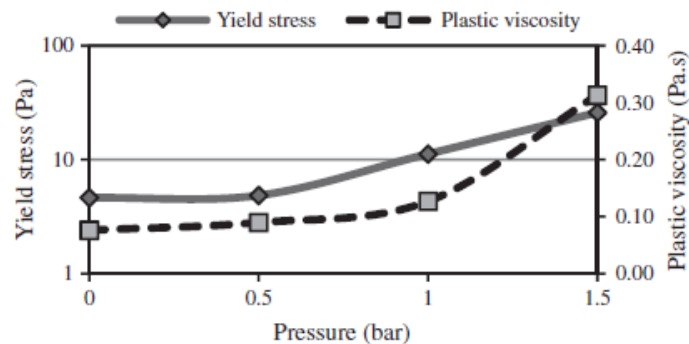


Figura 2.5 – Efeito da pressão na tensão de cedência (“*Yield stress*”) e viscosidade plástica (“*Plastic viscosity*”) de um *grout* de cal hidráulica com SF=2% e SP=0,8% [12]

Valores mais elevados de pressão (1,5 ou 2,0 bar) permitem uma redução do tempo de injeção, embora possam causar demasiada turbulência e criar problemas no interior da alvenaria que se pretende reabilitar [20].

Assim, segundo diversos autores, a melhor escolha de pressão para uma injeção eficaz de *grout* de cal hidráulica, apresenta valores entre 0,5 bar [15, 60] e 1,0 bar [20, 29], para composições de *grout* semelhantes à usada neste estudo.

2.3. Adjuvantes e adições

2.3.1. Superplastificantes

De acordo com a norma NP EN 934-2 [35], os superplastificantes (SP) são adjuvantes que sem modificar a sua consistência permitem reduzir fortemente a dosagem de água dum dado betão, ou sem modificar a dosagem de água aumentar consideravelmente o abaixamento ou espalhamento, ou produzir os dois efeitos simultaneamente.

Os superplastificantes são adicionados durante a amassadura em quantidades muito pequenas, e a sua presença na composição do *grout* concede uma variedade de benefícios relacionados com a trabalhabilidade.

Para melhor compreender os superplastificantes, é necessário perceber qual é o seu principal objectivo e os seus efeitos no sistema água-ligante. Sendo assim, pode dizer-se que o principal objectivo dos superplastificantes é controlar e melhorar o comportamento reológico de *grouts* de injeção, desfloculando a pasta de cimento ou cal hidráulica e aumentando a quantidade de água livre na mistura. Aquando uma melhoria do comportamento reológico da pasta, como consequência directa da adição do superplastificante, pode-se ainda obter dois outros resultados: em primeiro lugar, o aumento da resistência e durabilidade com a redução da quantidade de água na mistura (razão água/ligante) preservando a trabalhabilidade pretendida, e um segundo, no qual se mantém a quantidade de água na mistura e modificando-se a trabalhabilidade com a adição do superplastificante [50].

O superplastificante é um adjuvante dispersante cuja acção é baseada em forças repulsivas. De um ponto de vista químico, o superplastificante é um agente de superfície activo que actua sobre as partículas de ligante por meio de cargas electrostáticas e/ou anexando longas cadeias de polímeros sobre as partículas, criando uma repulsão entre eles [49]. Assim, por acção do superplastificante é esperado uma melhoria dos parâmetros reológicos, como a redução de viscosidade plástica e tensão de cedência. Desta forma, a tensão de cedência e, em menor extensão, a viscosidade plástica, diminuem com o aumento da concentração de superplastificante até uma dosagem máxima de superplastificante. Assim, com o uso de superplastificantes conseguem-se tensões de cedência muito baixas devido à dispersão das partículas [50].

Dito de outra forma, quando se mistura o ligante com a água, que é uma substância dipolar, ocorre floculação das partículas pelas tensões capilares devidas à presença da água. Os superplastificantes permitem desencadear a desfloculação dos aglomerados das partículas de ligante. Os mecanismos de acção que promovem a desfloculação do ligante são: repulsão electrostática e repulsão estérica.

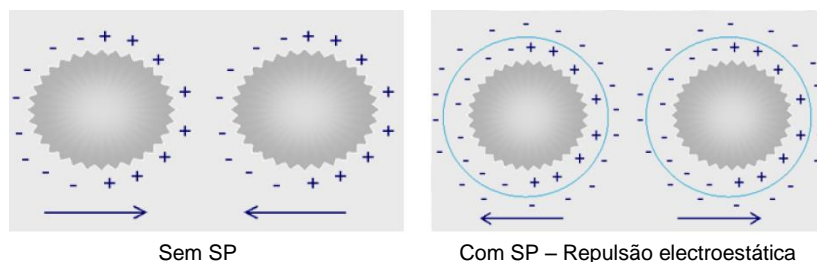


Figura 2.6 – Esquema representativo do mecanismo de acção do superplastificante sobre as partículas de grout

Segundo Baltazar *et al.* [9], a adição de superplastificante não só contribui para uma melhor desempenho do grout, em termos reológicos, de estabilidade e de retenção de água, como também apresenta resultados benéficos na resistência à compressão do grout.

2.3.2. Sílica de fumo

Toumbakari *et al.* colocaram a questão: “Qual a solução ideal que garanta simultaneamente durabilidade e eficiência estrutural?” [59]. A resposta poderá não ser única. A solução poderá estar na adição de outros materiais às misturas à base de cal hidráulica, que proporcionem uma melhoria nas resistências mecânicas do conjunto e proporcionem durabilidade suficiente, como a usada neste estudo, a sílica de fumo.

Um grout deve apresentar fluidez e penetrabilidade adequadas, de modo a se obter boa injectabilidade e com a capacidade de preencher as fendas e vazios do meio, assegurando a continuidade da alvenaria a reabilitar. Isto significa que um simples grout composto por ligante e água não é adequado para adquirir a performance desejada [12]. De acordo com trabalhos anteriores em que se estudou o efeito de diferentes adições nas propriedades quer no estado fresco, quer no estado endurecido de grouts à base de cal hidráulica [8, 9, 11] o uso de sílica de fumo provou ter efeitos benéficos na estabilidade do grout, permitindo uma melhor retenção de água, devido ao reduzido tamanho das partículas de sílica de fumo. A sílica de fumo apresenta ainda uma substancial melhoria da resistência à compressão do grout.

A sílica de fumo é um pó ultrafino que provem da indústria electrometalúrgica e funciona como pozolana quando usada em conjunto com ligantes cimentícios. Num grout de cal hidráulica que é composto por partículas grandes e longas existem vazios por preencher que podem ser ocupados pelas pequenas partículas de sílica de fumo (cerca de 100x menores que as partículas de HL5). Isto provoca uma diminuição das forças de atrito entre as partículas de cal, o que causa um efeito lubrificante que facilita o início do escoamento do grout, ou seja, uma redução da tensão de cedência da mistura [45]. No entanto, estas partículas mais finas causam um aumento da superfície de contacto,

o que resulta num aumento das forças de contacto entre as partículas sólidas (interacções de Van-der-Waal's), assim requerendo a presença de um redutor de água de qualidade para minimizar o problema, como o superplastificante [5, 45].

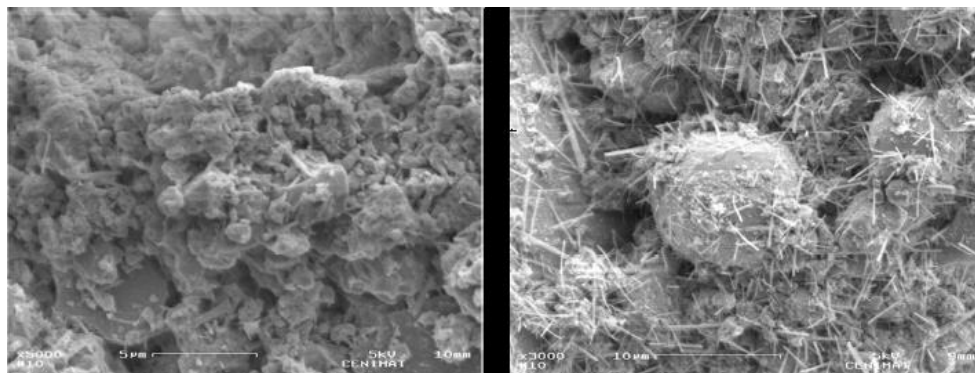


Figura 2.7 – Imagens de microscópio electrónico com 7 dias no estado endurecido: de um *grout* sem aditivos a 5000x (esq.) e de um *grout* com 10% de sílica de fumo a 3000x (dir.) [9]

De acordo com Kadri *et al.* [42], a influência da sílica de fumo na trabalhabilidade é uma questão complexa, visto que esta aumenta a concentração em volume na fase sólida e também a superfície específica. Além disso, deve-se ter em conta que a sílica de fumo, o superplastificante e a cal hidráulica irão interagir consoante a concentração de cada um. Kadri *et al.* verificaram que a presença de sílica de fumo acima de 10% provoca um aumento considerável da tensão de cedência, como resultado da maior área de contacto, o que significa, um pior comportamento reológico do *grout*.

Segundo Baltazar *et al.* [8, 9] é de notar que a sílica de fumo tem um efeito negativo no comportamento reológico de um *grout* à base de cal hidráulica. Contudo este pode ser resolvido com a presença de superplastificante, visto que em conjunto permitem um significativo aumento da estabilidade do *grout*. Portanto, pode-se constatar que a adição de uma dosagem pequena de sílica de fumo é favorável em *grouts* de cal hidráulica, visto não prejudicar o escoamento da injeção de *grout* e melhorar as propriedades mecânicas no estado endurecido [56, 57].

Kadri *et al.* [42] refere ainda que a presença de sílica de fumo causa uma ligeira aceleração no processo de obtenção de resistência mecânica do *grout*.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL DE INJEÇÃO DE *GROUT* EM PROVETES

No presente capítulo, começa-se por caracterizar os materiais estudados, que apresentam variações quer a nível da composição do *grout*, quer na granulometria do meio poroso. Descreve-se ainda o método de injeção das amostras, e por fim, apresenta-se a referida listagem das amostras a ser analisadas nos capítulos 4 e 5.

3.1. Materiais estudados

3.1.1. Composição do *grout*

Como referido no capítulo anterior, o *grout* é constituído por um ligante, água e adjuvantes, e ainda possivelmente, adições. O ligante utilizado na formulação do *grout* foi a cal hidráulica HL5 (2009) da SECIL-Martingança, cujas características são apresentadas no quadro 3.1. A escolha por este ligante deveu-se à maior compatibilidade mecânica, física e química que este apresenta com os materiais originais das alvenarias históricas comparativamente ao cimento [38].

Quadro 3.1 – Características da cal hidráulica HL5

Resistência mecânica à compressão (MPa)	7 dias $\geq 2,0$ 28 dias $\geq 5,0$ e $\leq 15,0$
Finura (%)	$90\mu\text{m} \leq 15,0$ $200\mu\text{m} \leq 5,0$
Tempo de presa (h)	inicial: > 1 final: $\leq 15,0$
Expansibilidade (mm)	$\leq 2,0$
Sulfato (SO ₃) (%)	$\leq 2,0$
Cal disponível (Ca(OH) ₂) (%)	$\geq 15,0$

Dados de acordo com a ficha técnica do fornecedor

Como adjuvante foi usado superplastificante que, como se constatou anteriormente, melhora as propriedades reológicas do *grout*. Desta forma não foi necessária a utilização de uma dosagem água/ligante muito elevada [39] para a obtenção de um *grout* com boa fluidez que consequentemente permitisse uma boa injectabilidade. Assim, adoptou-se uma relação de água/ligante de 0,5. O

superplastificante usado foi GLENIUM SKY 617 (BASF) com as seguintes características que se apresentam no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Características do superplastificante

Nome comercial	Glenium Sky 617 (BASF)
Função	Reduzir a dosagem de água do <i>grout</i>
Estrutura do material	Policarboxilato
Cor	Castanho líquido
Densidade (g/cm³)	1,06-1,10
pH	5-7
Teor de iões cloreto	< 0,10

Dados de acordo com a ficha técnica do fornecedor

Este superplastificante pertence à terceira geração em que a repulsão é a combinação de efeitos estéricos e electrostáticos, mais conhecida como repulsão electroestérica, que contribui para um aumento da distância entre as partículas sólidas. Portanto, a adição de superplastificante resulta na redução de floculação das partículas e segregação e melhora as propriedades reológicas, diminuindo a viscosidade plástica e a tensão de cedência [8].

Em determinadas amostras foi adicionada sílica de fumo (SF) não densificada produzida pela MAPEI de acção pozolânica, com características identificadas no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Características da sílica de fumo

Forma do produto	Pó não densificado
Cor	Cinzento-escuro
Densidade (g/cm³)	2,20
Tamanho médio da partícula	0,1-0,3 µm
Acção principal	Pozolânica
Acção secundária	Filler
Teor de material seco	100%

Dados de acordo com a ficha técnica do fornecedor

Em ordem a avaliar as variações do efeito de superplastificante e da adição de sílica de fumo, as amostras foram injectadas com diferentes composições de *grout*, que se apresentam no quadro 3.4. A designação do *grout* em questão, é feita em função da percentagem de sílica de fumo (SF).

Quadro 3.4 – Composição dos diferentes *grouts* de injeção

Designação	% de HL5	% de Sílica de fumo	% de superplastificante	Relação Água/Ligante
<i>Grout 0%SF</i>	100	0	1,2	0,5
<i>Grout 2,5%SF</i>	97,5	2,5		
<i>Grout 5%SF</i>	95	5		
<i>Grout 10%SF</i>	90	10		

No quadro 3.5 apresentam-se as diferenças de resistência mecânica dos *grouts* em estudo, que apresentam maiores valores, como expectável, de forma crescente consoante a maior presença de sílica de fumo.

Quadro 3.5 – Tensão de resistência à compressão dos *grouts* em estudo

	<i>Grout 0%SF</i>	<i>Grout 2,5%SF</i>	<i>Grout 5%SF</i>	<i>Grout 10%SF</i>
Tensão de resistência à compressão [MPa]	5,11	8,05	8,15	8,18

3.1.2. Areia

A areia foi o meio poroso escolhido para este estudo. Foram utilizadas areias da AREIPOR, lavadas e posteriormente secas em estufa, com diferentes tamanhos das partículas de areia, divididos em quatro tipos, como ilustram o quadro 3.6 e a figura 3.1. A escolha destes diferentes tamanhos foi semelhante à de estudos anteriores, embora feitos com diferentes materiais [25, 40].

Quadro 3.6 – Tamanho das partículas de areia

Grosso (4,75mm - 9,5mm)	Médio (2,0mm - 4,75mm)	Fino (1,18mm - 2,36mm)	Mais fino (0,5mm - 1,18mm)
APAH 4	APAH 6	APAH 12	APAH 20



Figura 3.1 – Diferentes tamanhos das partículas de areia (Grosso, médio, fino e mais fino)

De forma a simular as condições existentes no interior de uma alvenaria de pedra foi criado o meio poroso 40G/40M/15F/5f, no qual se injectaram os diferentes *grouts* e se estudaram as variáveis descritas anteriormente. Adicionalmente criou-se o meio poroso 40G/40M/20F que não é constituído por partículas mais finas. Ambas as composições dos meios porosos são apresentadas no quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Meios porosos em estudo

Meio poroso	Tamanho das partículas de areia			
	Grosso (4,75mm - 9,5mm)	Médio (2,0mm - 4,75mm)	Fino (1,18mm - 2,36mm)	Mais fino (0,5mm - 2mm)
40G/40M/15F/5f	40%	40%	15%	5%
40G/40M/20F	40%	40%	20%	-

Em seguida apresentam-se as curvas granulométricas dos diferentes tamanhos das partículas de areia, na figura 3.2, e as curvas granulométricas dos dois meios porosos em estudo, na figura 3.3.

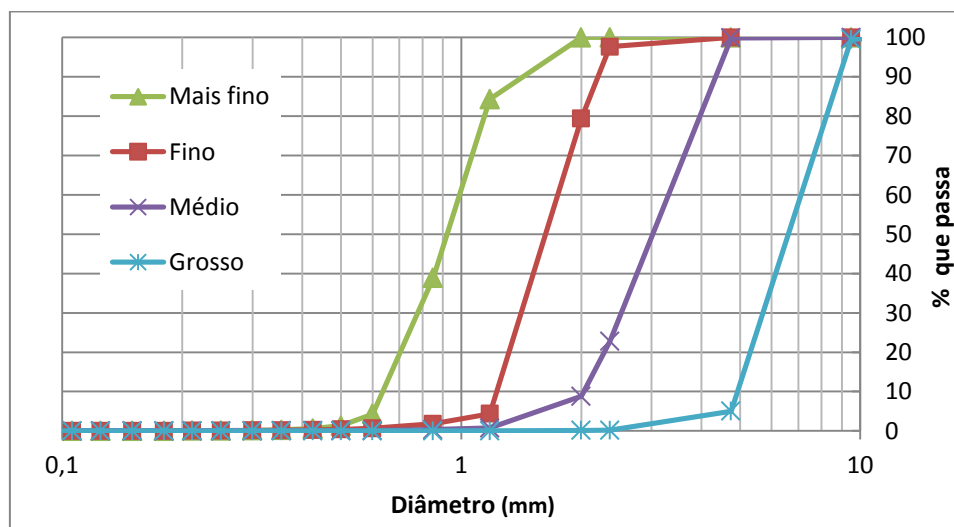


Figura 3.2 – Curva granulometria dos diferentes tamanhos das partículas de areia

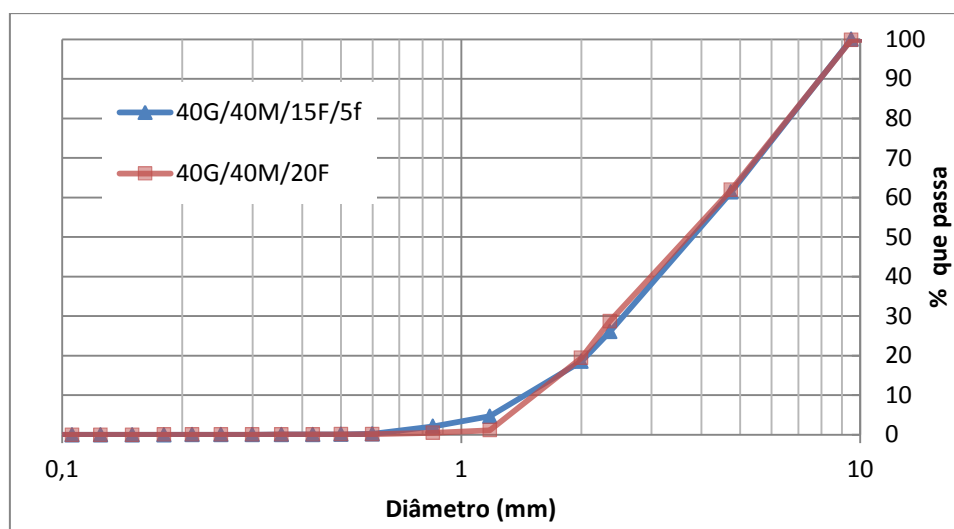


Figura 3.3 – Curva granulométrica dos diferentes meios porosos

Apresentam-se ainda, no quadro 3.8, as características de cada meio poroso. De realçar que para a presença de material mais fino no meio poroso 40G/40M/15F/5f implica menor volume de vazios, menor d_{10} (diâmetro da partícula correspondente a 10% de material passado), e maior baridade.

Quadro 3.8 – Características dos meios porosos

	Meio poroso	
	40G/40M/15F/5f	40G/40M/20F
Baridade [g/cm³]	1,50	1,47
Volume de Vazios [%]	42,67	43,55
d_{10} [mm]	1,49	1,58

3.2. Método de injeção

Como referido anteriormente, o presente trabalho vem no seguimento de injeções de *grout* realizadas para a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne, nas quais foram utilizados modelos simplificados que pretendem simular a injeção de *grouts* no núcleo, ou pano interior, de alvenarias antigas de pedra. Estes modelos envolveram a utilização de cilindros acrílicos com 152 mm de diâmetro e 300 mm de altura, nos quais foi depositado o meio poroso, areia neste caso, para posterior injeção. De referir ainda que se recorreu a uma metodologia desenvolvida por Jorne [40], que consiste na introdução de uma camada descontínua de material calcário com 2 cm de altura sob a base dos meios porosos a injectar. Esta introdução constitui uma solução para evitar o adensamento de partículas do meio poroso junto ao local de entrada da injeção, tendo como objectivo não provocar

problemas de perturbação e obstrução por parte do meio poroso à passagem do *grout* nesta zona.

As injeções foram realizadas segundo o método que se apresenta nas figuras 3.4 e 3.5, de acordo com a norma ASTM C943, e utilizam um sistema dispositivo baseado em trabalhos anteriores [13, 20, 62].

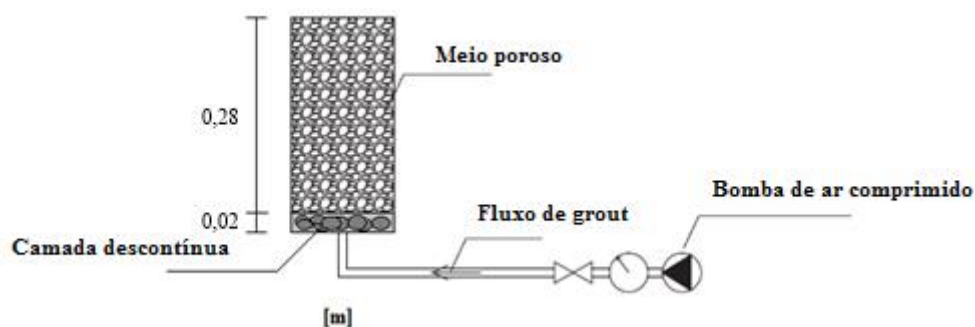


Figura 3.4 – Esquema representativo do método de injeção (adaptado de [25])



Figura 3.5 – Modelo real do método de injeção [39]

A injeção foi efectuada unidireccionalmente, da base para o topo, com uma pressão constante durante o processo, mas variando consoante a amostra em estudo, podendo tomar valores de 0,5 bar, 1 bar e 2 bar. No momento da injeção variam ainda a temperatura e o tempo de repouso, ou seja, o tempo entre a preparação do *grout* e a sua injeção no meio poroso.

De notar que, a injeção de *grout* realizada com recurso ao modelo apresentado pode proporcionar melhores condições de injeção relativamente a uma situação de uma alvenaria real, visto que no modelo existem mais vazios ligados entre si do que é expectável num caso real, especialmente no interior dos panos de alvenaria [13].

3.3. Amostras para a injeção com *grout*

Nos quadros seguintes apresenta-se a listagem das amostras para injeção dos diferentes *grouts*. Além dos diferentes meios porosos e *grouts* anteriormente descritos, apresentam-se as condições em que são efectuadas as injeções, no qual variam:

- Pressão: 0,5 bar, 1 bar e 2 bar;
- Tempo de repouso do *grout*: 0 min e 60 min;
- Temperatura: 5°C, 20°C e 40°C.

De notar que para cada um dos casos seguidamente descritos foram feitos três provetes, de modo a serem analisados pelos diferentes métodos de análise referidos nos capítulos 4 e 5.

3.3.1. Amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f

3.3.1.1. *Grout 0%SF*

Quadro 3.9 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com *grout 0%SF*

Identificação	Pressão [bar]	Tempo de repouso [min]	Temperatura [°C]
G _{0%;1bar;0min;5°C}	1,0	0	5
G _{0%;1bar;0min;20°C}			20
G _{0%;1bar;0min;40°C}			40
G _{0%;0,5bar;0min;5°C}	0,5	0	5
G _{0%;0,5bar;0min;20°C}			20
G _{0%;0,5bar;0min;40°C}			40
G _{0%;1bar;60min;5°C}	1,0	60	5
G _{0%;1bar;60min;20°C}			20
G _{0%;1bar;60min;40°C}			40

3.3.1.2. Grout 2,5%SF

Quadro 3.10 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com grout 2,5%SF

Identificação	Pressão [bar]	Tempo de repouso [min]	Temperatura [°C]
G _{2,5%;1bar;0min;20°C}	1,0	0	20

3.3.1.3. Grout 5%SF

Quadro 3.11 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com grout 5%SF

Identificação	Pressão [bar]	Tempo de repouso [min]	Temperatura [°C]
G _{5%;1bar;0min;20°C}	1,0	0	20

3.3.1.4. Grout 10%SF

Quadro 3.12 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/15F/5f injectadas com grout 10%SF

Identificação	Pressão [bar]	Tempo de repouso [min]	Temperatura [°C]
G _{10%;1bar;0min;5°C}	1,0	0	5
G _{10%;1bar;0min;20°C}			20
G _{10%;1bar;0min;40°C}			40
G _{10%;1bar;60min;5°C}	1,0	60	5
G _{10%;1bar;60min;20°C}			20
G _{10%;1bar;60min;40°C}			40
G _{10%;2bar;0min;5°C}	2,0	0	5
G _{10%;2bar;0min;20°C}			20
G _{10%;2bar;0min;40°C}			40
G _{10%;2bar;60min;5°C}	2,0	60	5
G _{10%;2bar;60min;20°C}			20
G _{10%;2bar;60min;40°C}			40

3.3.2. Amostras com meio poroso 40G/40M/20F

Quadro 3.13 – Condições no momento de injeção de amostras com meio poroso 40G/40M/20F injectadas com *grout* 0%SF

Identificação	Pressão [bar]	Tempo de repouso [min]	Temperatura [°C]
G _{40G/40M/20F;1bar}	1,0	0	20
G _{40G/40M/20F;0,5bar}	0,5		20

3.4. Processo de cura das amostras

Como descrito anteriormente, as injeções de *grout* podem ocorrer sob diferentes condições ambientais, e por isso, este estudo pretende avaliar o efeito de diferentes temperaturas (5°C, 20°C e 40°C), mas apenas no momento em que a injeção de *grout* é efectuada. O processo de cura da totalidade das amostras foi feito durante 180 dias (longo-prazo) em ambiente controlado e constante, de 22°C de temperatura e 65% de humidade relativa.

Caso a fase de cura fosse igualmente sujeita a diferentes temperaturas, estaria a acrescentar-se uma nova variável. Ora, tal poderia resultar em problemas na análise dos resultados por se desconhecer se um dado resultado se deveria ao efeito da temperatura no momento da injeção ou ao efeito da temperatura no processo de cura.

4. AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRA-SONS E DE ENSAIOS MECÂNICOS

Como já referido, o presente trabalho incide na realização de técnicas não destrutivas, especificamente, ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica com o intuito de avaliar a qualidade das injecções de *grouts* no meio poroso arenoso. Estas técnicas de análise podem ser aplicadas de uma forma bastante útil na detecção da morfologia interna dos modelos criados, fornecendo uma informação quantitativa e qualitativa sobre a sua compacidade [38]. Desta forma, podem ser detectadas áreas de injecção onde o *grout* tem maior dificuldade de penetração, e assim perceber a influência dos parâmetros em estudo. No presente capítulo analisa-se a utilização da técnica do ensaio de ultra-sons e posteriormente no capítulo 5 analisa-se a tomografia ultra-sónica.

Realizaram-se também ensaios mecânicos, nomeadamente, o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) e o ensaio de corte (*Shear Test*), com o intuito de conhecer as suas resistências mecânicas. Posteriormente comparam-se estes resultados com os ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica, de forma a conferir a eficácia de análise das injecções efectuadas, com recurso a estas técnicas não-destrutivas.

4.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio por ultra-som é uma técnica não-intrusiva e é realizado com o uso de ondas mecânicas ou acústicas colocadas no meio em inspecção. O ultra-som é uma onda mecânica longitudinal com frequência acima de 20KHz, não audível para o ser humano [3].

“O ensaio de ultra-sons consiste na determinação da velocidade de propagação dum impulso ultra-sónico, entre dois pontos, tendo em vista a obtenção de informação sobre as características dos elementos ensaiados. Trata-se de um ensaio bastante expedito e eficiente, pois permite avaliar as características dos materiais de uma forma não-destrutiva” [38]. O ensaio ultra-sónico baseia-se no princípio de propagação das ondas elásticas, segundo o qual a sua velocidade de propagação depende das propriedades elásticas do meio, e é tanto maior quanto mais denso for o material, uma vez que a onda se propaga por vibração das partículas sólidas. Deste modo, através da variação da velocidade de transmissão, é possível detectar alterações significativas nas características dos materiais ensaiados [4, 14].

O ensaio de ultra-sons foi realizado de acordo com a norma ASTM C597-02 [2], segundo o método por transmissão directa (*trough-transmission*), como ilustrado na figura 4.1 e na figura 4.2. Este método consiste na colocação de um transdutor emissor de um dos lados do corpo a ensaiar e de

um transdutor receptor na face oposta. De modo a garantir uma medição eficaz evitando bolsas de ar foi colocado um agente de ligação, um gel para ultra-sons, entre os transdutores e as amostras. Foi utilizado um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*) LAB da PROCEQ, que emite um impulso eléctrico de frequência ultra-sónica. Utilizou-se um transdutor cónico de 54kHz, e um valor de sinal emitido de 500V e o ganho máximo permitido pelo equipamento (100x), que segundo Coelho [25] são as condições que permitem melhores resultados.

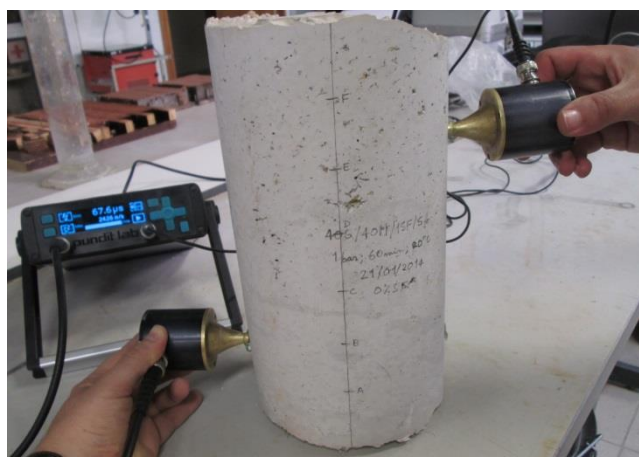


Figura 4.1 – Medição efectuada em provete inteiro



Figura 4.2 – Medição efectuada numa fatia

Garantindo um bom acoplamento entre o material a ensaiar e os transdutores, procedeu-se à medição dos tempos (T em segundos) que o impulso emitido levou a percorrer as distâncias (L em metros) desde o transmissor até ao receptor. A velocidade de ultra-sons foi então obtida do seguinte modo:

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Para garantir uma medição real do material da amostra, esta não deve apresentar humidade no seu interior, devido a este ser um factor que leva a aumento da velocidade de propagação de ultra-sons. Além disso, deve igualmente garantir-se a realização do ensaio a uma temperatura no intervalo entre 5°C e 30°C, visto que neste intervalo as variações de velocidade de propagação não são relevantes [52]. Deste modo, os ensaios de ultra-sons foram realizados após a secagem das amostras numa estufa a uma temperatura de $60\pm 5^\circ\text{C}$ e o posterior arrefecimento até à temperatura ambiente [31].

Para a avaliação de cada um dos provetes injectados procedeu-se à realização de dois tipos de ensaios distintos. O ensaio de ultra-sons do provete inteiro e das fatias, ambos abordados em seguida.

4.1.1. No provete inteiro

O ensaio de ultra-sons no provete inteiro tem como objectivo analisar a amostra como um todo, e para tal foi usada uma malha como a ilustrada na figura 4.3. Esta metodologia foi desenvolvida por Jorne [38], em que a malha é constituída por seis pontos em cada uma das quatro linhas longitudinais às amostras e perpendiculares com os topos, distando os pontos de cada linha da malha 4cm entre si, e distando o ponto inferior 6cm relativamente à base dos provetes devido à presença da camada descontínua de 2cm.

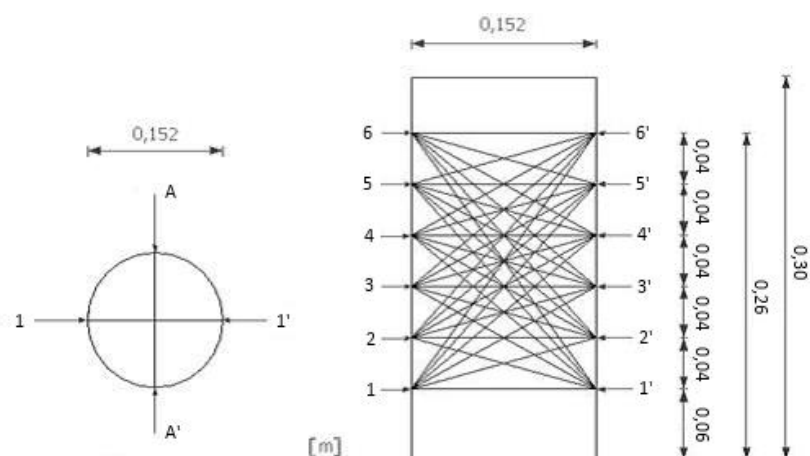


Figura 4.3 – Malha de ensaio de ultra-sons de provete inteiro: vista de topo (esq.) e corte 1-1' (dir.)

Os resultados serão igualmente usados *a posteriori* para elaboração dos tomogramas ultra-sónicos, apresentados no capítulo 5.

4.1.2. Nas fatias

Após o estudo da propagação de ondas ultra-sónicas na totalidade do provete e da recolha dos dados necessários à elaboração da análise tomográfica (capítulo 5), os provetes foram sujeitos a cortes transversais de acordo com o esquema representado na figura 4.4 a 2cm, 10cm, 18cm e 26cm relativamente à face inferior da base. Destes cortes resultaram três fatias distintas de cada amostra: base (fatia localizada entre os 2 e os 10cm de altura do provete), meio (fatia localizada entre os 10 e os 18cm de altura do provete) e topo (fatia localizada entre os 18 e os 26cm de altura do provete). A zona superior e a camada descontínua não foram consideradas.

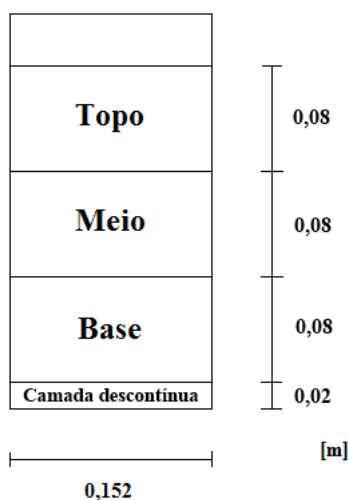


Figura 4.4 – Esquema de localização dos cortes efectuados nos provetes

O corte foi realizado húmido com recurso a uma máquina de corte JUMBO e a sua execução encontra-se ilustrada na figura 4.5. O procedimento a realizar foi apenas de marcação, fixação e corte dos provetes nas zonas pretendidas.



Figura 4.5 – Corte de provete

Assim, como objecto de estudo foram utilizadas as fatias resultantes do corte dos provetes e não a sua totalidade. O ensaio de ultra-sons das fatias tem como objectivo analisar as diferenças em altura do meio poroso injectado, de modo a compreender a eficácia da injeção em função da altura. Neste caso, a malha utilizada para medição das velocidades de propagação de ultra-sons foi obviamente diferente da anterior. A malha de pontos, tal como usado por Coelho e Jorne [25, 38, 41], foi disposta em forma de pentágono, localizada a meia altura de cada fatia e encontra-se ilustrada na figura 4.6. De referir que na mesma figura, as distâncias a azul têm um comprimento de 14,5cm, enquanto as distâncias marcadas a vermelho têm um comprimento de 8,9cm.

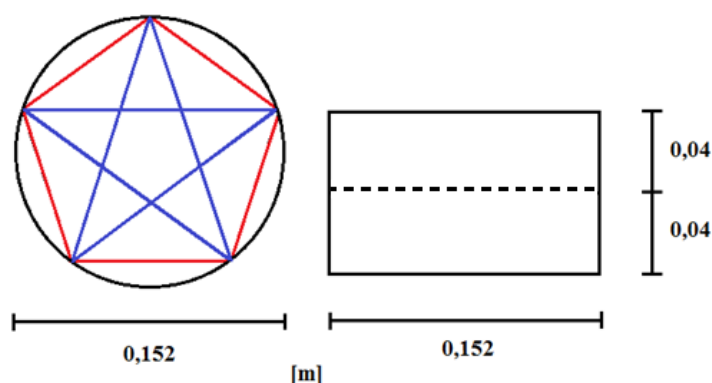


Figura 4.6 – Esq.: Vista de topo da malha pentagonal utilizada em cada fatia; Dir.: Vista lateral do posicionamento intermédio da malha na altura de cada fatia [25]

4.2. Ensaio mecânicos

Após a realização do ensaio de velocidade de ultra-sons seguiu-se a realização dos ensaios mecânicos – o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) e o ensaio de corte (*Shear Test*) – em cada uma das fatias.

Ambos os ensaios realizaram-se na máquina de ensaio ZWICK/ROELL Z050 com célula de carga de 50kN. Os parâmetros de funcionamento foram definidos com uma pré-carga no valor de 100N e uma deformação imposta de 0,7 mm/min no caso do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, e 0,9 mm/min no caso do ensaio de corte. O sistema de ensaio descrito pode observar-se na figura 4.7.



Figura 4.7 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Antes de se iniciarem os ensaios é necessário conhecer as dimensões das amostras, e como tal foram realizadas medições em todas as fatias de modo a obter o diâmetro e a espessura médios. As medições foram efectuadas com recurso a uma craveira, como ilustrado na figura 4.8, e os valores utilizados para o cálculo final das resistências resultaram da média de quatro medições, quer do diâmetro, em quatro direcções distintas, quer da espessura das fatias, em quatro pontos distintos.

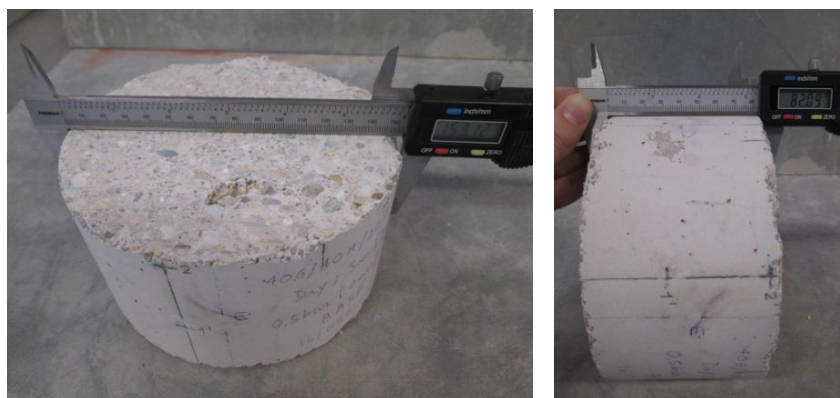


Figura 4.8 – Esq.: Medição do diâmetro da fatia; Dir.: Medição da espessura da fatia

4.2.1. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Com o conhecimento destas dimensões obtidas anteriormente, procedeu-se à realização do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*), de acordo com a norma C496/C496M–04 [1]. Este consiste na compressão do provete (neste caso, as fatias das amostras) através da aplicação de força em duas geratrizes diametralmente opostas, tal como ilustrado

na figura 4.9, que consequentemente provoca o aparecimento de tracções na direcção perpendicular à força aplicada, originando a rotura do provete.

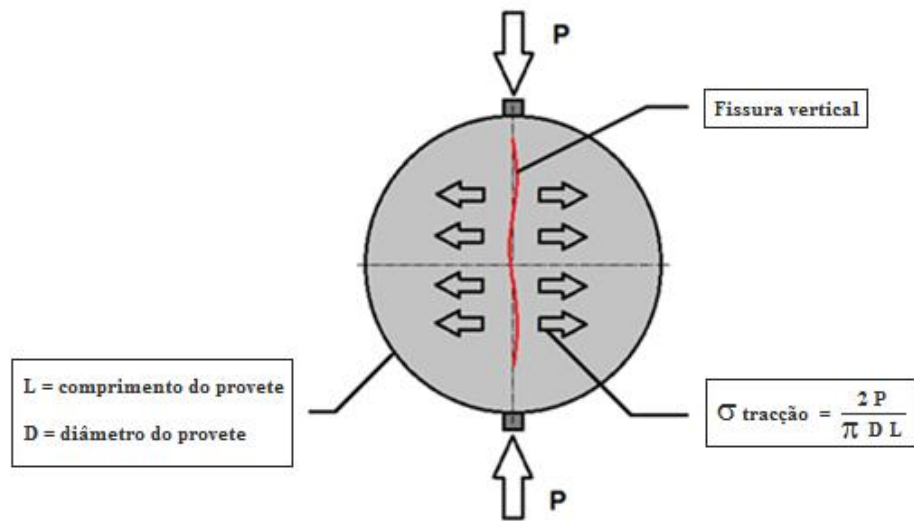


Figura 4.9 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral [25]

Na figura 4.10 é possível observar um exemplo do aspecto real de uma fatia após submetida ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, ilustrando o mecanismo descrito anteriormente.

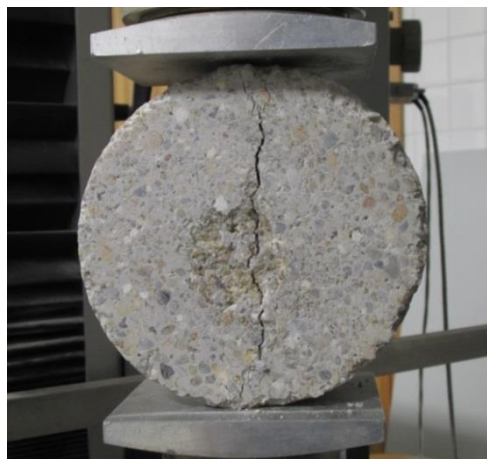


Figura 4.10 – Aspecto de uma fatia de uma amostra após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Através da realização do ensaio, obtém-se o valor da força de rotura P e calcula-se a resistência à tracção por compressão diametral $T_{tracção}$ segundo a fórmula:

$$T_{tracção} = \frac{2P}{\pi L D} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Em que:

$T_{\text{tração}}$ – Resistência à tração [MPa]

P – Força de rotura [N]

L – Comprimento do provete [mm]

D – Diâmetro do provete [mm]

4.2.2. Ensaio de resistência ao corte

Depois de conhecidas as dimensões das fatias, procedeu-se à realização do ensaio de corte (*Shear Test*) que consiste na aplicação de duas forças com a mesma direcção, sentidos opostos e alinhamentos diferentes, uma vez que a resultante de cada uma das forças é o centro de gravidade de semicírculos opostos em cada uma das faces, como se pode observar na figura 4.11. Esta acção “de faca” causa a rotura na zona de corte.

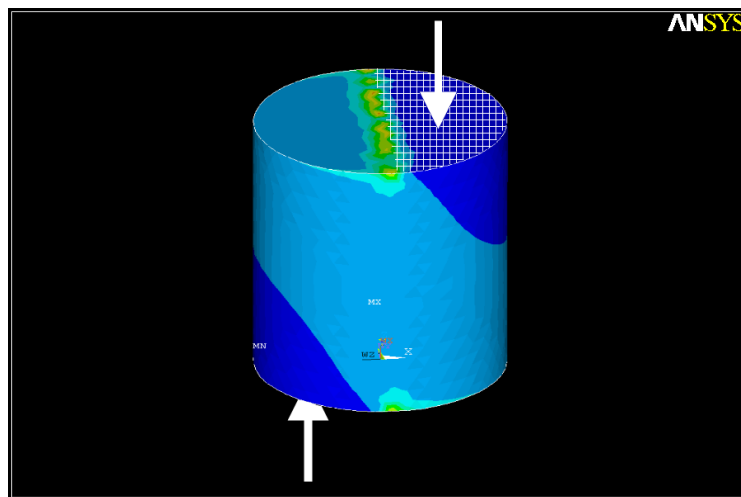


Figura 4.11 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de corte [36]

Na figura 4.12 apresenta-se um exemplo do aspecto real de uma fatia após submetida ao ensaio de corte, ilustrando o mecanismo anteriormente descrito.



Figura 4.12 – Aspecto de uma fatia de uma amostra após um ensaio de corte

Através da realização do ensaio, obtém-se o valor da força de rotura F e calcula-se a resistência ao corte T_{corte} de acordo com seguinte fórmula:

$$T_{\text{corte}} = \frac{F}{h D} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Em que:

T_{corte} – Resistência ao corte [MPa]

F – Força de rotura [N]

h – Altura do provete [mm]

D – Diâmetro do provete [mm]

4.3. Análise de resultados do provete inteiro

A seguinte apresentação de resultados é referente à análise ultra-sónica dos provetes inteiros. De forma a facilitar a compreensão do texto, a análise referida será efectuada separadamente consoante o tipo de *grout*, e seguidamente, o parâmetro em estudo.

4.3.1. Grout 0%SF

4.3.1.1. Efeito da temperatura de injeção

A temperatura é um factor que influencia fortemente a microestrutura do *grout*. Assim, com recurso aos seguintes gráficos procurou-se averiguar o efeito da temperatura sobre as propriedades de

escoamento do *grout*, de forma a melhor compreender o comportamento do fluxo de *grouts* de cal hidráulica sem sílica de fumo sob diferentes temperaturas. Nas figuras 4.13 e 4.14 apresentam-se, respectivamente, para uma pressão de injeção de 1 bar e de 0,5 bar, as velocidades de ultra-sons em função da distância entre os transdutores dos provetes injectados com temperaturas de 5°C, 20°C e 40°C.

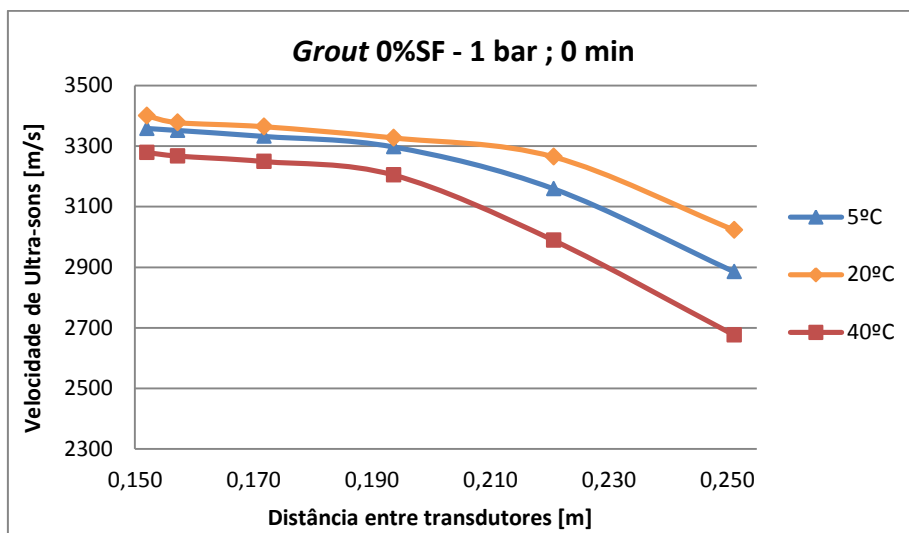


Figura 4.13 – $G_{0\%;1bar;0min}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

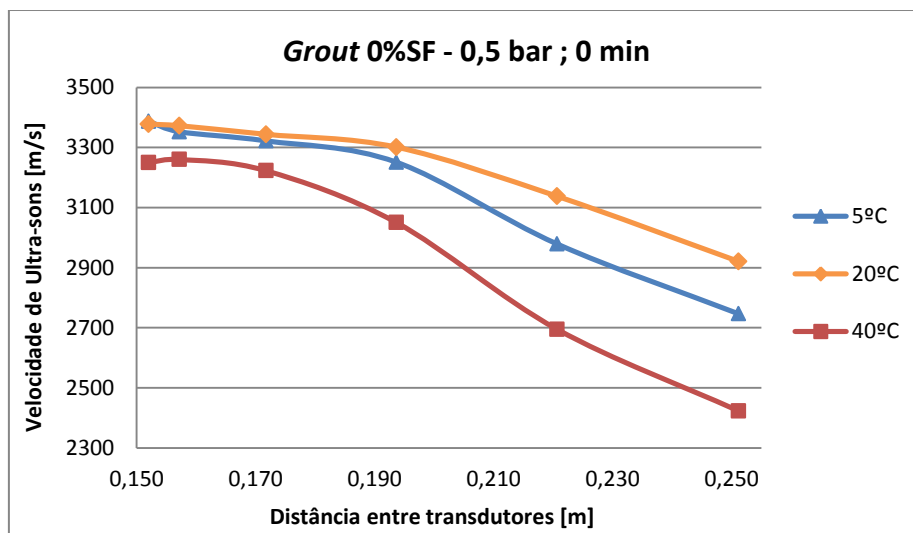


Figura 4.14 – $G_{0\%;0,5bar;0min}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

Analisando os dois gráficos em questão, conclui-se que os provetes injectados a uma temperatura de 20°C apresentam maiores velocidades de ultra-sons em função da distância entre os transdutores, quer com injeções realizadas à pressão de 1 bar ou de 0,5 bar. Por outro lado, provetes com a temperatura de 40°C apresentaram os piores resultados nesta análise, sendo mais evidente na pressão de injeção mais baixa. Este comportamento confirma os resultados do gráfico apresentado

anteriormente na figura 2.3 (vd. 2.2.3), em que a temperatura de 40°C é o que leva a um pior comportamento reológico do *grout*, isto é, maior viscosidade plástica e maior tensão de cedência. Este fenómeno pode também dever-se à maior quantidade de água que se evapora do *grout* durante a injeção, devido à maior temperatura. À medida que a água vai evaporando do *grout*, a fricção interna e a colisão entre partículas sólidas aumenta, dando origem a uma maior tensão de cedência [6] e, consequentemente obtém-se uma menor penetrabilidade no meio poroso. A menor penetrabilidade proporciona uma menor compacidade da amostra, que é reflectido em menores velocidades de propagação de ultra-sons.

Note-se ainda que à temperatura de 40°C dá-se uma hidratação rápida no estado inicial que leva a uma distribuição mais heterogénea dos produtos da hidratação, sendo que os hidratos precipitam-se à volta das partículas de ligante, dando origem a uma camada mais densa, em comparação com os processos mais lentos que ocorrem a baixas temperaturas, levando à constituição dos silicatos hidratados em menor densidade e a uma distribuição mais homogénea dos produtos [50].

No caso de temperaturas mais baixas, como a 5°C, a temperatura do *grout* começa a aproximar-se do ponto de congelação da água, o que leva à formação de fortes ligações de hidrogénio. Por sua vez, ao nível molecular, a temperatura está relacionada com os movimentos aleatórios das partículas (movimento Browniano) conforme mencionado anteriormente. Isto significa que, para temperaturas mais baixas, a agitação molecular diminui (partículas de *grout* estão mais próximas umas das outras), assim, um menor estado de liberdade provoca uma maior floculação (maior rapidez de floculação da microestrutura). Além disso, é também possível que, a temperaturas mais baixas, possa ocorrer uma diminuição na intensidade do mecanismo de dispersão das moléculas de superplastificante, causada por alterações no arranjo espacial do superplastificante adsorvido [12].

Ligeiramente diferente do verificado nos gráficos com tempo de repouso de 0 minutos, a figura 4.15 apresenta para 60 minutos, diferenças mais evidentes entre as curvas, com melhores resultados de velocidade de ultra-sons para a temperatura de 5°C, seguido dos 20°C, sendo novamente os piores valores para 40°C.

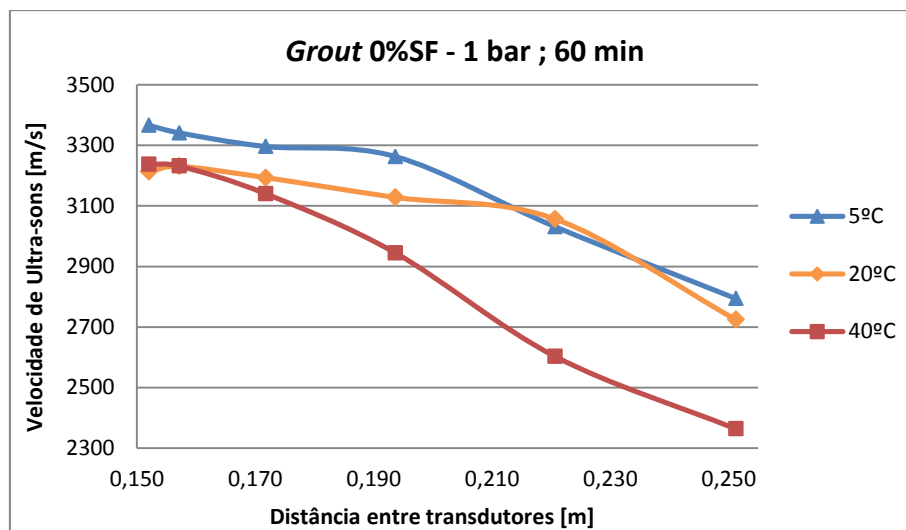


Figura 4.15 – $G_{0\%;1bar;60min}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

Estes resultados vão de encontro aos obtidos por Jorne [36] (figura 4.16) para a injectabilidade do *grout* com 60 minutos de tempo de repouso para diferentes temperaturas.

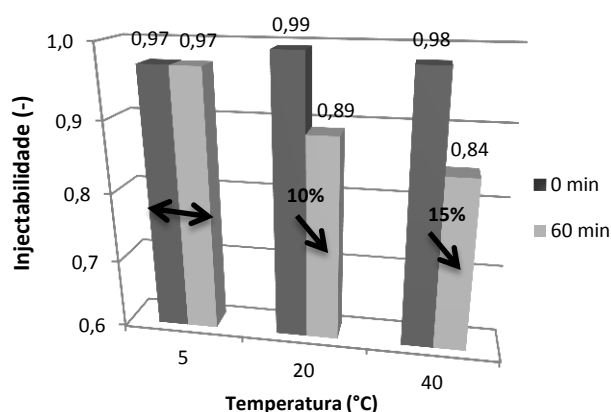


Figura 4.16 – Influência da temperatura na injectabilidade do *grout* (Resultados obtidos por Jorne [36])

Para além dos parâmetros reológicos, o fenómeno da floculação, que varia em função do tempo e da temperatura de repouso, é particularmente importante durante a injeção de *grout* [62]. Na figura 4.17, pode observar-se um gráfico obtido por Jorne [36] que apresenta a influência da temperatura e do tempo de repouso na floculação do *grout*. Os resultados mostram que *grouts* com maior área de floculação apresentam menor injectabilidade. Tendo em conta que maior floculação significa forças de atracção mais fortes entre as partículas de ligante (combinação de interações de Van-der-Waals e forças de atracção electrostáticas), consequentemente, a dispersão não é tão facilmente alcançada. Assim, uma vez que para maiores temperaturas existe maior floculação do *grout*, isto é, há mais tendência para as partículas sólidas de *grout* se agruparem ao longo do tempo dado que o *grout* está em repouso, o que leva a que o *grout* tenha menor capacidade de injectabilidade.

Esta menor injectabilidade significa que as amostras apresentam menor compacidade, que se traduz em menores velocidades de ultra-sons registadas para os provetes injectados a 20°C e, especialmente, a 40°C.

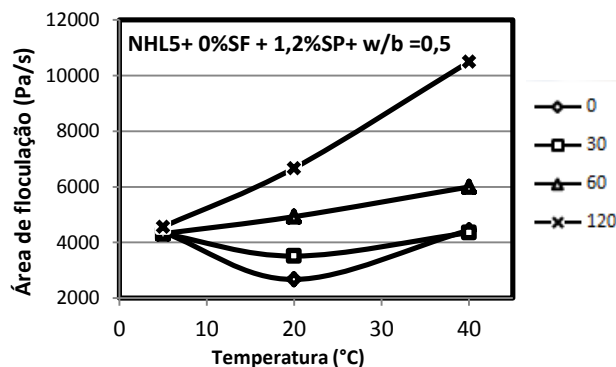


Figura 4.17 – Influência da temperatura e do tempo de repouso na área de floculação do grout (Resultados obtidos por Jorne [36])

De notar maiores oscilações nas curvas dos grouts com 60 minutos de repouso que significam resultados com maiores variações em função da distância entre os transdutores. Este facto parece indiciar que se tratam de injecções mais heterogéneas, quando comparadas com os resultados da figura 4.13 e da figura 4.14 referentes a injecções com 0 minutos de tempo de repouso.

4.3.1.2. Efeito da pressão de injecção

Procura-se agora uma nova abordagem dos mesmos resultados apresentados para estudo do efeito que a temperatura de injecção causa no grout. Pretende-se assim avaliar a influência de outro parâmetro em estudo, a pressão de injecção. Assim, seguidamente apresentam-se três gráficos, figura 4.18, figura 4.19 e figura 4.20, para temperaturas de injecção de 5°C, 20°C e 40°C, respectivamente, em que a única variável é a pressão de injecção de 1 bar ou 0,5 bar. Pretende-se assim perceber os resultados de uma injecção com maior pressão e outra com menor pressão, analisados através das velocidades ultra-sónicas medidas para o provete inteiro.

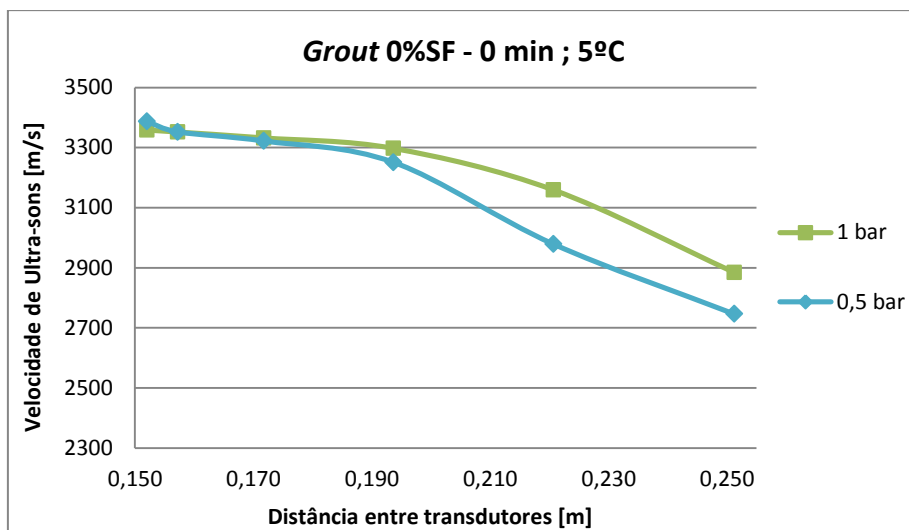


Figura 4.18 – $G_{0\%;0min;5^{\circ}C}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

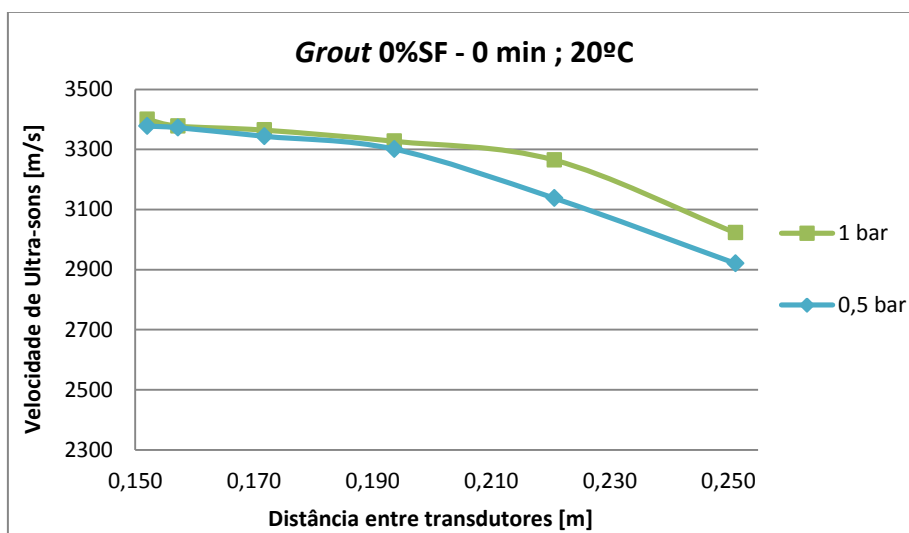


Figura 4.19 – $G_{0\%;0min;20^{\circ}C}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

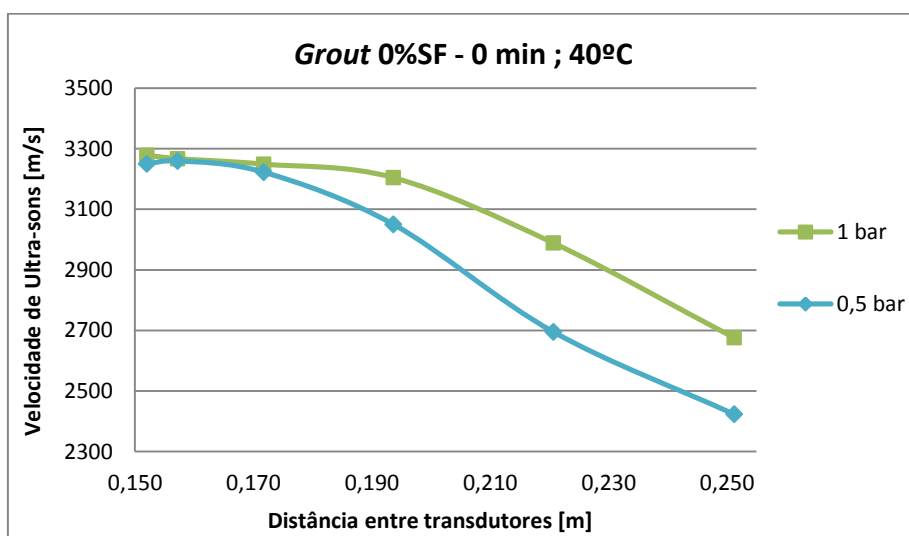


Figura 4.20 – $G_{0\%;0min;40^{\circ}C}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

Observando os três gráficos de estudo da pressão conclui-se que se obtêm melhores resultados para a pressão de injeção de 1 bar. No entanto, e como se verá na análise dos tomogramas ultra-sónicos (vd. 5.3.1.2), nota-se que em meio poroso em que o *grout* tenha capacidade para preencher os vazios, como o caso de 5°C, e principalmente o de 20°C, a pressão não é um factor que faça variar a capacidade de injeção, apenas a taxa de injectabilidade, isto é, a velocidade de injeção, como observou Jorne em [36]. Daí as velocidades de ultra-sons serem semelhantes.

Para o caso de 40°C a injeção realizada a 0,5 bar apresenta com maior evidência velocidades de ultra-sons inferiores relativamente à pressão de 1 bar. Como visto anteriormente em 4.3.1.1, a influência de uma maior temperatura de injeção leva a uma menor capacidade de penetração do *grout*, que se torna mais evidente quando a taxa de corte no interior do tubo de injeção é menor, visto que causa uma maior viscosidade do *grout*, e consequentemente, menor injectabilidade.

De notar que para distâncias maiores os provetes injectados a 0,5 bar parecem apresentar maiores diferenças, com resultados ligeiramente inferiores relativamente às de pressão de 1 bar. Isto pode dever-se ao facto de a pressão ser demasiado baixa para o *grout* penetrar com sucesso nos vazios mais afastados.

4.3.1.3. Efeito do tempo de repouso do *grout*

Nesta secção pretende-se agora averiguar a influência que o tempo de repouso, que um *grout* tem antes de ser injectado, causa na injectabilidade dos provetes. Nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23, para temperaturas de injeção de 5°C, 20°C e 40°C, respectivamente, apresenta-se a comparação entre o *grout* sem tempo de repouso (0 min) e o *grout* com 60 minutos de tempo de repouso.

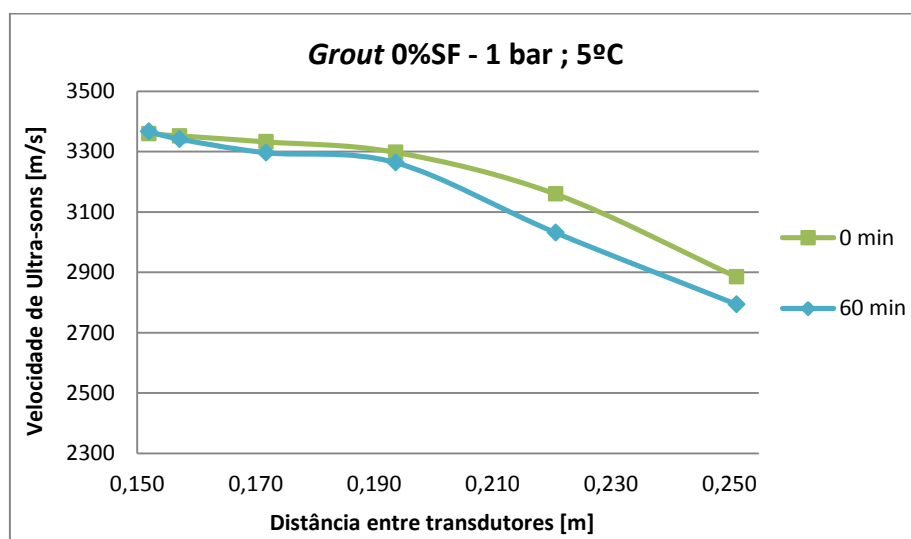


Figura 4.21 – $G_{0\%;1bar;5^{\circ}C}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

Em relação ao efeito do tempo de repouso do *grout*, através da análise da figura 4.21 correspondente à temperatura de 5°C, pode afirmar-se que os resultados são semelhantes, com ligeira vantagem para os 0 minutos. Esta aproximação de ambas as curvas pode ser explicada pelo facto de, a baixas temperaturas, as reacções de hidratação serem mais lentas. Além disso, a 5°C existe uma maior percentagem de água livre, permitindo que as reacções de hidratação se dêem por mais tempo [50]. O facto desta maior lentidão nas reacções químicas do *grout* reflecte-se ainda na floculação que, tal como visto no gráfico da figura 4.17 (vd. 4.3.1.1), apresenta resultados praticamente iguais para um tempo de repouso de 0 e 60 minutos. Por isso, para um tempo de repouso de 60 minutos, a temperatura de 5°C parece não ter tanta influência como nos casos de 20°C e 40°C.

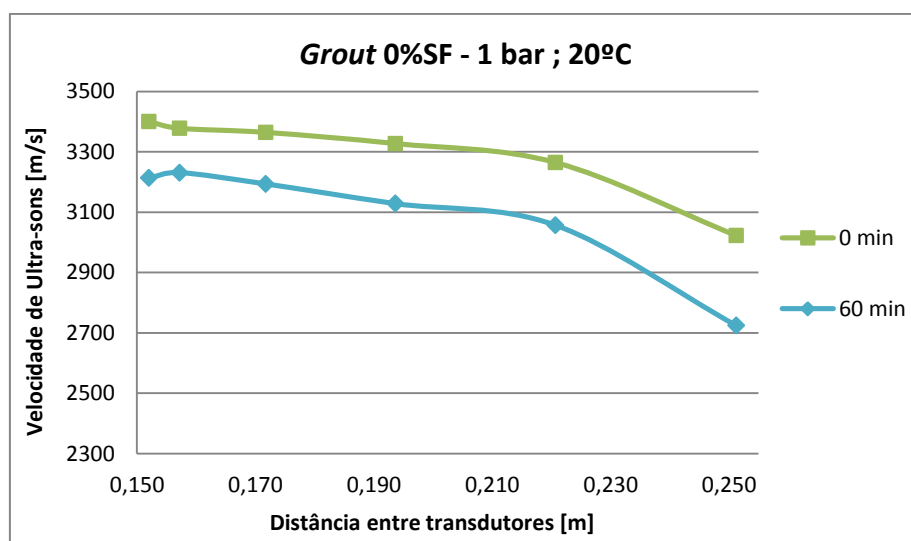


Figura 4.22 – $G_{0\%;1bar;20^{\circ}C}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

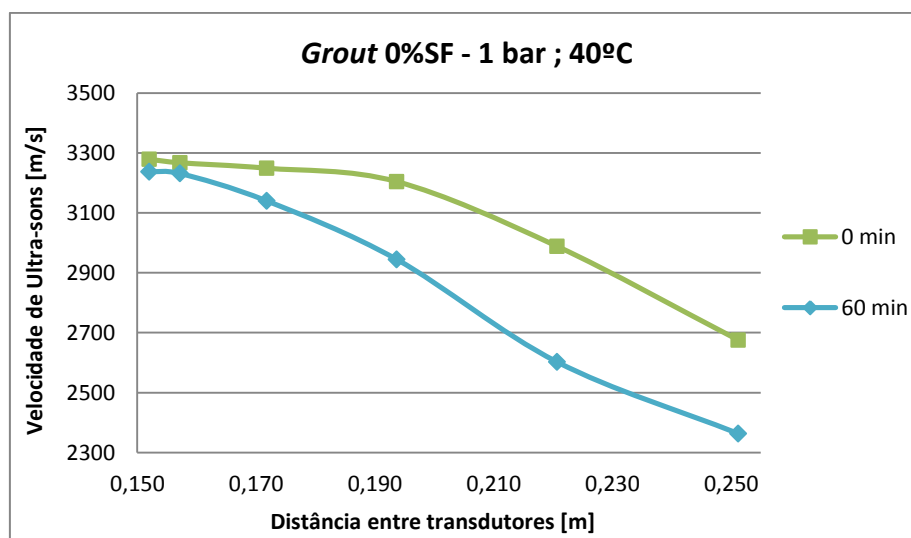


Figura 4.23 – $G_{0\%;1bar;40^{\circ}C}$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

Assim para 20°C e 40°C, figura 4.22 e figura 4.23 respectivamente, as diferenças entre 0 e 60 minutos são maiores visto que o aumento de temperatura conduz a reacções de hidratação mais rápidas e a um maior estado de floculação. Por isso, as diferenças entre as curvas de 0 e 60 minutos são ainda mais evidentes para a maior temperatura, 40°C. Além disso, o crescimento dos produtos de hidratação na superfície das partículas do ligante vai cobrir as camadas adsorvidas de superplastificante, o que resulta numa perda progressiva de acção de dispersão do superplastificante [12].

4.3.2. Grout 2,5%SF, Grout 5%SF e Grout 10%SF

Nos provetes referentes aos *grouts* de 2,5%, 5% e 10% de sílica de fumo, obteve-se apenas um sucesso de injeção parcial. O *grout* penetrou apenas até a uma altura média máxima de 14cm no provete de 2,5% de sílica de fumo, sendo inferior nos restantes *grouts*. Assim, não foi possível obter amostras em condições adequadas à realização do ensaio ultra-sónico para o provete inteiro, sendo que estas amostras foram apenas analisadas para a fatia da base nos restantes ensaios.

Após retirar-se a cofragem do provete e o meio poroso solto, isto é, as partículas de areia às quais não foi possível fazer chegar o *grout*, pôde-se analisar visualmente essa área em que ocorreu o bloqueio. Como se pode observar no exemplo apresentado na figura 4.24, parece existir um excesso de partículas de *grout* na superfície da amostra.



Figura 4.24 – Amostra com *grout* com sílica de fumo em que ocorre injeção parcial devido a bloqueio: Vista de perfil (esq.) e vista superior (dir.)

A explicação para tal é a ocorrência de um efeito tampão por parte das partículas de *grout*. Acontece neste caso que as partículas de sílica de fumo como são muito pequenas (cerca de 100x menores que as partículas de HL5) têm tendência para flocularem em aglomerados maiores que originam esta acção de bloqueio [40]. Este fenómeno denomina-se de filtração do *grout* (“*filtration tendency*” em inglês) e está ilustrado na figura 4.25 e ocorre quando um aglomerado de partículas de

grout se acumula na entrada ou no interior de um vazio ou fissura, impedindo o fluxo do *grout* e a penetração adicional [30].

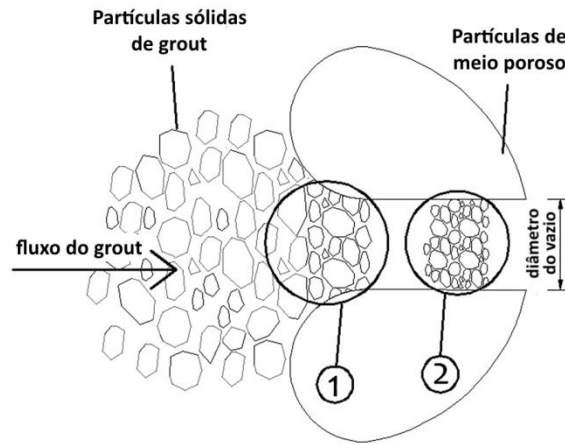


Figura 4.25 – Formação de aglomerado flocular: na entrada do vazio (1), no interior do vazio (2) (adaptado de [40])

4.3.3. Comparação com meio poroso 40G/40M/20F

Na figura 4.26 apresenta-se uma comparação entre as velocidades ultra-sónicas obtidas para diferentes meios porosos. O meio poroso 40G/40M/15F/5f que tem sido analisado até aqui é um meio poroso sem a presença das menores partículas de finos, isto é, o meio poroso 40G/40M/20F. Pretende-se avaliar que influência nas injeções de *grout* tem a presença ou ausência dessas menores partículas de areia, para a pressão de injeção de 1 bar e 0,5 bar.

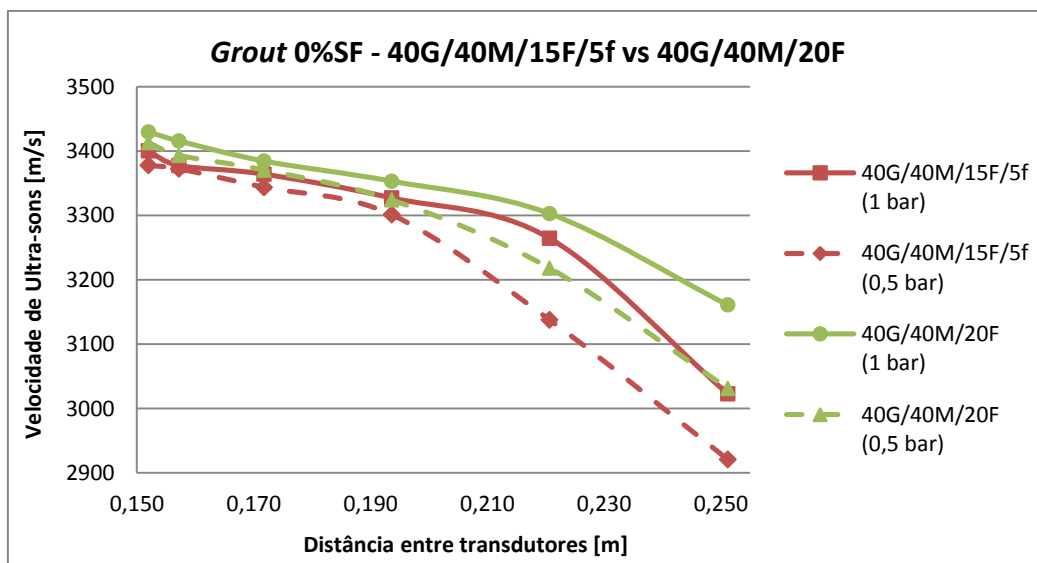


Figura 4.26 – $G_{0\%}; 0min; 20^{\circ}C$: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs. distância entre transdutores [m]

Numa análise global ao gráfico da figura 4.26, pode observar-se que o meio poroso sem a presença de partículas mais finas, isto é, o meio poroso 40G/40M/20F, apresenta maiores velocidades ultra-sónicas que o meio poroso 40G/40M/15F/5f, tanto para a pressão de 1 bar, como para 0,5 bar.

Para menores distâncias existe uma menor probabilidade de encontrar vazios, por isso não há grandes diferenças a realçar. No entanto à medida que as distâncias aumentam, aumentam igualmente as diferenças entre os provetes. Para distâncias maiores já se verifica que tendencialmente existe um decréscimo das velocidades ultra-sónicas no meio poroso com partículas mais finas, visto que apresenta menores vazios entre as partículas de areia. Tal se verifica quer para pressão de 1 bar, quer para 0,5 bar, sendo que para este último como a pressão é metade existe uma menor capacidade para penetrar em vazios de menor dimensão. Assim, no meio poroso com menores vazios (40G/40M/15F/5f) há menor capacidade de injectabilidade, logo existem mais vazios após a injeção, e consequentemente menores velocidades de ultra-sons.

4.4. Análise de resultados das fatias

A análise de resultados das fatias combina dois tipos de ensaios, o ensaio de ultra-sons, não-destrutivo, e o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, destrutivo. Deste modo é possível a comparação de resultados de ensaios diferentes, mas com a mesma finalidade, a de avaliar o estado interior da amostra.

Para classificação do estado da injeção em função da altura do provete, criou-se o parâmetro “Gradiente”. Para o ensaio mecânico o Gradiente encontra-se nas unidades descritas. Contudo para o ensaio de ultra-sons, optou-se por classificar o Gradiente com os símbolos: (+) para positivo, (-) para negativo, e (X) para um Gradiente nulo ou inexistente.

4.4.1. Grout 0%SF

4.4.1.1. Efeito da temperatura de injeção

Seguidamente apresentam-se os resultados de velocidade de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral, com os respectivos gradientes, com objectivo de avaliar a influência da temperatura de injeção em função da altura, para 5°C, 20°C e 40°C. No quadro 4.1 pode observar-se os resultados para a pressão de injeção de 1 bar, e no quadro 4.2 para a pressão de 0,5 bar do *grout* sem sílica de fumo.

Quadro 4.1 – G_{0%;1bar;0min}: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

Grout 0%SF - 1 bar ; 0 min										
Temperatura de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
5°C	3079	3159	3152	3130	+	1,03	1,09	1,03	1,05	0,00
20°C	3190	3257	3269	3239	+	1,10	1,20	1,10	1,14	0,04
40°C	2870	3123	2834	2942	-	0,97	1,06	0,72	0,92	-1,52
Média	3047	3180	3085	3104	X	1,03	1,12	0,95	1,04	-0,49

Avaliando globalmente o efeito da temperatura de injeção para a pressão de 1 bar e 0,5 bar, pode concluir-se que, tal como observado em 4.3.1.1, os melhores resultados dão-se para 20°C e os piores para 40°C. Os ensaios de resistência à tracção por compressão diametral corroboram os valores obtidos de velocidades ultra-sónicas, que apresentam gradientes praticamente iguais. A excepção é o caso de temperatura de injeção de 5°C e 1 bar de pressão que apresenta um gradiente nulo para o ensaio mecânico e um gradiente positivo, ainda que ligeiramente para o ensaio não-destrutivo. No entanto, para os dois casos de 20°C também é de notar uma diferença entre ambos os ensaios, visto que o maior valor do ensaio de ultra-sons obtém-se na fatia do topo, e no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral a melhor fatia é a do meio. A explicação para este facto pode estar na forma como os resultados são obtidos para os dois ensaios. Apesar de o *grout* ser injectável até este nível, e por isso, apresentar um estado compacto e tal ser reflectido nas velocidades ultra-sónicas, as ligações criadas entre o *grout* e o meio poroso podem não ser tão boas como as obtidas para a fatia do meio, devido a uma relação água/ligante não óptima, dada a perda de grande quantidade de água no meio poroso até chegar ao topo. E é essa qualidade das ligações que se estabelecem entre o *grout* e as partículas do meio poroso que é factor determinante para a resistência à tracção por compressão diametral [25].

Quadro 4.2 – G_{0%;0,5bar;0min}: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 0,5 bar ; 0 min</i>										
Temperatura de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
5°C	2913	3080	3012	3002	+	0,98	1,03	1,00	1,00	0,18
20°C	3116	3144	3173	3144	+	1,06	1,13	1,11	1,10	0,29
40°C	2853	2834	2794	2827	-	0,84	0,90	0,79	0,83	-0,32
Média	2960	3019	2993	2991	X	0,96	1,02	0,97	0,98	0,05

A explicação para um pior resultado à temperatura de 40°C passa em grande parte, como referido em 4.3.1.1, pela diferença nas reacções de hidratação. Uma hidratação rápida no estado inicial (temperaturas mais altas) leva a uma distribuição mais heterogénea dos produtos da hidratação, sendo que os hidratos precipitam à volta das partículas do ligante dando origem a uma densa camada em seu redor. A baixas temperaturas, a hidratação começa lentamente, o que permite aos iões dissolvidos mais tempo para se difundirem antes dos hidratos se precipitarem, levando à constituição dos silicatos hidratados em menor densidade, a uma distribuição mais homogénea dos produtos e a uma porosidade menos grosseira (“*coarse porosity*”) [50].

A hidratação dos ligantes hidráulicos é bastante sensível à temperatura. A elevação da temperatura acelera a presa e o endurecimento, mas baixa a velocidade de crescimento da tensão de rotura, diminuindo portanto a resistência final. O abaixamento da temperatura alonga a duração da presa, podendo mesmo impedi-la de ocorrer se a água congelar, e do endurecimento, mas não compromete a tensão de rotura final [47].

O quadro 4.3 apresenta agora a influência da temperatura no momento da injeção com *grouts* com um tempo de repouso de 60 minutos.

Quadro 4.3 – G_{0%;1bar;60min}: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

Grout 0%SF - 1 bar ; 60 min										
Temperatura de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
5°C	3042	3088	3017	3049	-	1,02	1,00	0,96	0,99	-0,35
20°C	2938	3139	2869	2982	-	1,01	0,95	0,79	0,91	-1,39
40°C	2755	3021	2521	2766	-	0,73	0,97	0,54	0,74	-1,19
Média	2912	3083	2802	2932	-	0,92	0,97	0,76	0,88	-0,97

Para um tempo de repouso de 60 minutos, os resultados presentes no quadro 4.3 são semelhantes aos obtidos para o provete inteiro, na medida em que as amostras injectadas a menor temperatura, 5°C, apresentam melhores valores para ambos os ensaios, seguidos pelos 20°C, e sendo claramente os piores resultados para a temperatura de 40°C.

Com um tempo de repouso de 60 minutos, os *grouts* encontram-se num estado de floculação avançado, no qual se estabelecem ligações permanentes (e irreversíveis) entre as partículas, isto é, mesmo que se volte a aplicar uma taxa de corte à mistura, estas já não se separam. Este impedimento em voltar ao estado inicial reduz a injectabilidade do *grout*. Assim sendo, as zonas mais afastadas do ponto de injeção terão menos *grout*, dando origem a pequenas zonas não injectáveis, que se traduzem em piores resultados registados nos ensaios. Este fenómeno é igualmente mostrado pelos gradientes negativos para todas as temperaturas, sendo substancialmente maior para maiores temperaturas.

De notar a maior semelhança entre os resultados dos ensaios ultra-sónicos com os ensaios mecânicos para os 0 minutos do que para os 60 minutos de tempo de repouso do *grout*. Tal pode ser explicado por uma maior homogeneidade obtida nas injeções a 0 minutos. A 60 minutos, o *grout* encontra-se com maior floculação, e por isso, obtém-se menor injectabilidade, o que proporciona zonas menos constantes, ficando sujeito a diferenças obtidas por um ensaio e por outro. Apesar de ambos os ensaios terem o mesmo objectivo, analisam-no de formas ligeiramente diferentes. O ensaio de ultra-sons depende principalmente da compacidade do material (a velocidade de propagação é tanto maior quanto mais denso for o material), enquanto que o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral depende não só da compacidade mas também das ligações que se estabelecem entre o *grout* e o meio poroso. Ainda assim, estas diferenças são mínimas e dentro da margem de erro dos ensaios em questão.

4.4.1.2. Efeito da pressão de injeção

Procura-se agora avaliar a influência de outro parâmetro em estudo, a pressão de injeção. Seguidamente apresentam-se o quadro 4.4, o quadro 4.5 e o quadro 4.6, para temperaturas de injeção de 5°C, 20°C e 40°C, respectivamente, em que a variável em estudo é a pressão de injeção de 1 bar ou 0,5 bar. Pretende-se assim analisar os resultados provenientes do ensaio ultra-sónico e do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral em função da altura do provete de injeções com maior pressão e outras com menor pressão.

Quadro 4.4 – $G_{0\%;0\text{min};5^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 0 min ; 5°C</i>										
Pressão de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
1 bar	3079	3159	3152	3130	+	1,03	1,09	1,03	1,05	0,00
0,5 bar	2913	3080	3012	3002	+	0,98	1,03	1,00	1,00	0,18
Média	2996	3119	3082	3066	+	1,00	1,06	1,02	1,03	0,09

Quadro 4.5 – $G_{0\%;0\text{min};20^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 0 min ; 20°C</i>										
Pressão de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
1 bar	3190	3257	3269	3239	+	1,10	1,20	1,10	1,14	0,04
0,5 bar	3116	3144	3173	3144	+	1,06	1,13	1,11	1,10	0,29
Média	3153	3201	3221	3191	+	1,08	1,17	1,11	1,12	0,16

Quadro 4.6 – G_{0%;0min;40°C}: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 0 min ; 40°C</i>										
Pressão de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
1 bar	2870	3123	2834	2942	-	0,97	1,06	0,72	0,92	-1,52
0,5 bar	2853	2834	2794	2827	-	0,84	0,90	0,79	0,83	-0,32
Média	2861	2978	2814	2885	-	0,91	0,98	0,76	0,87	-0,92

Analisando todas as amostras para as diferentes temperaturas, pode observar-se que os gradientes apresentam resultados da mesma ordem para ambas as pressões. Isto é, gradientes positivos para 20°C e 5°C, e negativos para a maior temperatura.

Comparando os resultados obtidos pelas duas pressões, conclui-se que se obtêm melhores injeções à pressão de 1 bar do que a 0,5 bar. Tal é traduzido pelos maiores resultados obtidos nas injeções realizadas com 1 bar de pressão, no ensaio ultra-sónico e no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, em todas as temperaturas estudadas.

Quanto à análise dos gradientes e das diferenças entre as fatias já se podem encontrar diferenças consoante a temperatura de injeção. Para 5°C e 20°C, em ambas as pressões os gradientes são positivos e baixos, o que indica que existem poucas variações em função da altura. Já no caso da temperatura de injeção de 40°C, apesar de para ambas as pressões os gradientes serem negativos, obtém-se um melhor valor para 0,5 bar, que neste caso é um valor não tão negativo.

De destacar ainda o maior valor de resistência à tracção por compressão diametral para a fatia do topo da amostra injectada a 0,5 bar e 40°C, em relação à fatia correspondente de 1 bar. Apesar das outras fatias apresentarem piores resultados, a menor turbulência provocada pela menor pressão de injeção parece favorecer para que nesta fatia do topo se consiga uma melhor resistência mecânica.

4.4.1.3. Efeito do tempo de repouso do grout

Nesta secção pretende-se agora averiguar a influência que o tempo de repouso, que um *grout* apresenta antes de ser injectado, provoca na injectabilidade dos provetes. O quadro 4.7 apresenta para a temperatura de 5°C, a comparação entre as amostras injectadas sem tempo de repouso e com 60 minutos de tempo de repouso.

Quadro 4.7 – G_{0%;1bar;5°C}: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 1 bar ; 5°C</i>										
Tempo de repouso	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0 min	3079	3159	3152	3130	+	1,03	1,09	1,03	1,05	0,00
60 min	3042	3088	3017	3049	-	1,02	1,00	0,96	0,99	-0,35
Média	3061	3123	3084	3089	X	1,02	1,04	1,00	1,02	-0,17

As resistências à tracção por compressão diametral corroboram as velocidades de ultra-sons obtidas com melhores resultados para 0 minutos do que para 60 minutos, ainda que ligeiramente. No entanto, apesar da ligeira diferença, é suficiente para que os gradientes a 60 minutos passem a ser negativos, o que reflecte um pior comportamento em altura, especialmente na fatia do topo.

Nos quadros 4.8 e 4.9 apresentam-se as comparações dos tempos de repouso de 0 minutos e de 60 minutos para 20°C e 40°C, respectivamente.

Quadro 4.8 – G_{0%;1bar;20°C}: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 1 bar ; 20°C</i>										
Tempo de repouso	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0 min	3190	3257	3269	3239	+	1,10	1,20	1,10	1,14	0,04
60 min	2938	3139	2869	2982	-	1,01	0,95	0,79	0,91	-1,39
Média	3064	3198	3069	3110	X	1,05	1,08	0,95	1,03	-0,68

Quadro 4.9 – $G_{0\%;1\text{bar};40^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

<i>Grout 0%SF – 1 bar ; 40°C</i>										
Tempo de repouso	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0 min	2870	3123	2834	2942	-	0,97	1,06	0,72	0,92	-1,52
60 min	2755	3021	2521	2766	-	0,73	0,97	0,54	0,74	-1,19
Média	2813	3072	2677	2854	-	0,85	1,02	0,63	0,83	-1,35

Para um *grout* sem tempo de repouso obtêm-se resultados mais estáveis ao longo da altura, visto que o *grout* apresenta melhores propriedades, como visto anteriormente, e como o *grout* acabou de ser misturado ainda não se estabeleceram ligações permanentes entre as suas partículas, isto é, floculação permanente. Logo, não existe uma perda de trabalhabilidade como acontece no caso de 60 minutos, o que leva a que o *grout* seja menos penetrável, logo origina gradientes negativos. Este factor é mais visível para maiores temperaturas (20°C e 40°C) do que para 5°C, uma vez que a tendência de floculação e velocidade das reacções de hidratação dependem da temperatura.

Note-se, contudo, que a elevada taxa de floculação pode ser a solução para resolver alguns problemas após a injeção; por exemplo, quando o *grout* já está localizado no interior da alvenaria, a gravidade pode dar origem à sedimentação de partículas de *grout* em repouso. Assim, uma alta taxa de floculação pode ser útil uma vez que irá aumentar a velocidade de ligações entre partículas, atenuando desta forma a deposição de partículas, e consequentemente, a estratificação da densidade do *grout* ao longo da altura de injeção [12].

4.4.2. *Grout 10%SF*

Apresentam-se nesta secção os resultados para provetes injectados com *grout* com 10% de sílica de fumo na sua constituição. Como referido anteriormente, as amostras com a presença de sílica de fumo obtiveram apenas injeções parciais, pelo que foi impossível realizar a análise por inteiro do provete. Assim a caracterização do estado das amostras com 10% de sílica de fumo é feita através dos seguintes quadros.

O quadro 4.10 apresenta os resultados das velocidades ultra-sónicas e das resistências à tracção por compressão diametral para os provetes com temperaturas de injeção de 5°C, 20°C e 40°C, para a pressão de 1 bar e tempo de repouso de 0 minutos.

Quadro 4.10 – $G_{10\%;1\text{bar};0\text{min}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

Grout 10%SF - 1 bar ; 0 min										
Temperatura de injeção	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
5°C	2829	X	X	2829	X	0,93	X	X	0,93	X
20°C	2982	X	X	2982	X	1,01	X	X	1,01	X
40°C	2473	X	X	2473	X	0,54	X	X	0,54	X
Média	2761	X	X	2761		0,83	X	X	0,83	

Observando o quadro acima referente ao *Grout* 10%SF pode analisar-se apenas os resultados das fatias da base, e por isso, não existem gradientes para ambos os ensaios. As velocidades ultrasónicas e as resistências à tracção por compressão diametral indicam melhores condições de injeção para a temperatura de 20°C, seguido de perto pelos 5°C. Os piores resultados são para os 40°C com resultados francamente baixos. Estes resultados consoante as temperaturas no momento da injeção obtidos para o *grout* com sílica de fumo estão em consonância com os resultados do *grout* sem sílica de fumo.

A maior velocidade de ocorrência das reacções de hidratação, que causa uma distribuição mais heterogénea dos produtos de hidratação, e o pior comportamento reológico são os factores determinantes para as piores injeções a 40°C. De referir ainda que o aumento dos produtos de hidratação na superfície das partículas do ligante pode cobrir as camadas adsorvidas de superplastificante, o que resulta numa perda progressiva de acção de dispersão do superplastificante. Nas injeções a 5°C, a baixa temperatura causa um menor estado de liberdade das partículas de *grout*, que provoca uma maior floculação, o que reduz a injectabilidade. Assim, tendo em conta os condicionalismos das temperaturas de injeção de 5°C e 40°C, é a 20°C que se obtém uma melhor injectabilidade, e por isso, melhores resultados nos ensaios realizados.

O quadro tipo apresentado anteriormente foi apenas realizado para os provetes de 1 bar e 0 minutos. Os restantes provetes tiveram piores injeções que atingiram ainda menor altura e, por isso, tornou-se difícil obter resultados correctos pelo ensaio de ultra-sons, sendo que se realizaram apenas os ensaios de resistência à tracção por compressão diametral destas amostras. O quadro 4.11 compila todos os resultados das amostras injectadas com *Grout* 10%SF. Os resultados seguintes apresentados são das únicas fatias disponíveis, ou seja, da base. Estes variam em função das temperaturas de 5°C, 20°C e 40°C para pressões de injeção de 1 bar e 2 bar e tempos de repouso de 0 e 60 minutos.

Quadro 4.11 – G_{10%}: Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral das fatias da base da totalidade das amostras com *Grout* 10%SF

Características dos provetes	Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	1 bar		2 bar		Média
	0 min	60 min	0 min	60 min	
5°C	0,93	0,88	0,80	0,80	0,85
20°C	1,01	0,86	0,97	0,77	0,90
40°C	0,54	0,39	0,58	0,31	0,46
Média	0,83	0,71	0,78	0,63	

O quadro 4.11 apresenta para *grouts* sem tempo de repouso, melhores resultados para 20°C e piores para 40°C, quer para a pressão de injeccção de 1 bar, quer para 2 bar. Para 60 minutos de tempo de repouso, os melhores resultados do ensaio mecânico passam a ser da temperatura de 5°C, seguidos de perto de 20°C e os piores, novamente, os de 40°C. Estes resultados vão de encontro aos anteriormente obtidos para o *grout* sem percentagem de sílica de fumo. A diferença mais relevante passa pelos valores de resistência à tracção por compressão diametral obtidos para as amostras injectadas a 40°C. Estas apresentam valores muito baixos, que revelam uma eficácia de injeccção extremamente reduzida.

De notar que as resistências à tracção por compressão diametral não são maiores para a pressão de injeccção de 2 bar. Isto significa que a maior pressão aplicada na injeccção não ajuda a penetrabilidade do *grout* no meio poroso, apenas aumenta a velocidade de injeccção. A elevada pressão pode causar instabilidade no interior do meio poroso, o que leva ao não preenchimento de tantos vazios como para o caso de 1 bar. A maior pressão dá origem a que o fluxo de *grout* tenha uma direcção dominante mais preponderante, isto é, o *grout* tende a escoar pelos canais com maior abertura não tendo capacidade para divergir para canais que ofereçam maior resistência à sua penetração.

4.4.3. Comparar os diferentes *grouts*

O objectivo nesta fase é comparar os diferentes tipos de *grout* que foram usados para injectar os provetes. O quadro 4.12 apresenta as velocidades ultra-sónicas e as resistências à tracção por compressão diametral para o *grout* sem sílica de fumo e os *grouts* com 2,5%, 5% e 10% de sílica de fumo. Para se poder comparar os resultados obtidos a única variável é o tipo de *grout*, sendo as restantes condições constantes, isto é, pressão de injeccção de 1 bar, *grout* sem tempo de repouso e 20°C de temperatura no momento da injeccção.

Quadro 4.12 – $G_{1\text{bar};0\text{min};20^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

1 bar ; 0 min ; 20°C										
Tipo de <i>grout</i>	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0%SF	3190	3257	3269	3239	+	1,10	1,20	1,10	1,14	0,04
2,5%SF	3361	X	X	3361	X	1,32	X	X	1,32	X
5%SF	2991	X	X	2991	X	1,04	X	X	1,04	X
10%SF	2982	X	X	2982	X	1,01	X	X	1,01	X
Média	3131	3257	3269	3143		1,12	1,20	1,10	1,13	

No quadro 4.12 destaca-se logo à partida, como já referido anteriormente, as injeções parciais dos provetes injectados com *grout* com a presença de sílica de fumo na sua composição. Assim, apenas se podem apresentar os resultados referentes à fatia única, a da base. No entanto, optou-se por apresentar todos os resultados das fatias do *grout* sem sílica de fumo, para se poder comparar com as amostras com sílica de fumo.

Analisando o quadro acima conclui-se que, apesar de a injeção não ter sido bem sucedida em altura, os melhores resultados surgem para o provete de *grout* com 2,5% de sílica de fumo, quer para o ensaio de ultra-sons, quer para o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral. Os piores resultados apresentam igualmente consonância entre os dois ensaios, e foram obtidos para o *grout* com 10% de sílica de fumo, seguido de perto pelas amostras injectadas com *Grout* 5%SF.

É interessante constatar que, apesar de as velocidades ultra-sónicas registadas terem sido ligeiramente superiores no provete com 2,5% de sílica de fumo, as resistências à tracção por compressão diametral parecem apresentar uma diferença mais evidente, comparando com os resultados do *Grout* 0%SF. Pode então inferir-se que o factor determinante para a resistência à tracção por compressão diametral de um meio poroso injectado com *grout* é a qualidade das ligações que este estabelece com as partículas do meio poroso, e essas ligações são melhores com a presença de sílica de fumo.

A sílica de fumo diminui a porosidade e permeabilidade do *grout*, e aumenta a sua resistência mecânica. A redução do volume total de poros no *grout* com sílica de fumo é causado pela alta reactividade pozolânica (entre o SiO_2 no pó de sílica e Ca(OH)_2 a partir de produtos de hidratação) e o efeito de enchimento de poros causado pelas pequenas partículas de sílica de fumo. As pequenas partículas de sílica de fumo podem ter preenchido de forma eficiente entre os grãos de cal hidráulica, e assim subdividindo o espaço dos poros, criando uma estrutura de poros muito mais denso. Portanto,

pode ser referido que a sílica de fumo actua tanto fisicamente, como material de enchimento, como quimicamente, reagindo com Ca(OH)_2 para formar C-S-H (Silicato de cálcio hidratado), para auxiliar na melhoria da resistência. Desta forma, o benefício da adição de sílica de fumo é duplo: reduzir o volume total de poros e aumentar a resistência mecânica [36].

Outro factor que possivelmente contribuiu para o registo de maiores velocidades ultra-sónicas e resistências à tracção por compressão diametral nas amostras de *Grout* 2,5%SF foi o menor volume de vazios resultante da retracção do *grout*. A diferença entre o fenómeno de retracção nas amostras dos dois *grouts* deve-se, fundamentalmente, à retracção por dessecação do *grout*. A maior absorção de água por parte das partículas de sílica de fumo, devido à maior quantidade de produtos de hidratação (Silicato de cálcio hidratado), significa menos água livre no interior da amostra durante o processo de cura, pelo que existe menos evaporação, e consequentemente, menor retracção. A menor retracção por dessecação do *grout* traduz-se em menos vazios no interior da amostra, conferindo condições para os melhores resultados por parte do *grout* com 2,5% de sílica de fumo [64].

No entanto, apesar de em teoria a presença de sílica de fumo em conjunto com superplastificante permitir uma melhoria significativa da estabilidade do *grout*, o uso de uma percentagem de sílica de fumo superior a 2,5% revelou uma contribuição pobre no comportamento reológico de *grouts* de cal hidráulica, porque o aumento da quantidade de sílica de fumo resultou numa pior performance. Visto que a sílica de fumo é muito mais fina do que as partículas de cal hidráulica, o superplastificante disponível por área de superfície diminui, resultando num *grout* mais viscoso e, consequentemente, menos injectável.

Seguidamente apresenta-se a comparação entre *grouts* mas com diferentes temperaturas de injeção. O quadro 4.13 para a temperatura de 5°C e o quadro 4.14 para 40°C. De notar que neste caso a comparação é feita unicamente entre o *grout* sem sílica de fumo e o *grout* com 10% de sílica de fumo.

Quadro 4.13 – $G_{1\text{bar};0\text{min};5^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

1 bar ; 0 min ; 5°C										
Tipo de <i>grout</i>	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0%SF	3079	3159	3152	3130	+	1,03	1,09	1,03	1,05	0,00
10%SF	2829	X	X	2829	X	0,93	X	X	0,93	X
Média	2954	3159	3152	2979		0,98	1,09	1,03	0,99	

Quadro 4.14 – $G_{1\text{bar};0\text{min};40^\circ\text{C}}$: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

1 bar ; 0 min ; 40°C										
Tipo de <i>grout</i>	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0%SF	2870	3123	2834	2942	-	0,97	1,06	0,72	0,92	-1,52
10%SF	2473	X	X	2473	X	0,54	X	X	0,54	X
Média	2672	3123	2834	2708		0,75	1,06	0,72	0,73	

Tal como visto para as amostras injectadas à temperatura de 20°C, as amostras de 5°C e 40°C apresentam valores inferiores para os provetes de *Grout* 10%SF. Embora para as amostras de 5°C as diferenças entre os dois *grouts* não sejam muito grandes, quer para o ensaio mecânico, quer para o ensaio ultra-sónico, em relação às amostras injectadas à temperatura de 40°C essas diferenças são bem claras. Isto demonstra que as piores condições de injeção devido à maior temperatura, em conjunto com a elevada percentagem de sílica de fumo, formam uma combinação demasiado gravosa, para que se obtenha uma injeção minimamente eficiente. A resistência mecânica da amostra de 40°C com sílica de fumo é praticamente metade do resultado obtido para o *grout* sem sílica de fumo.

4.4.4. Comparar diferentes granulometrias

No quadro 4.15 apresentam-se os resultados de velocidades ultra-sónicas e de resistências à tracção por compressão diametral da comparação entre dois diferentes meios porosos. Pretende-se avaliar a diferença no comportamento em função da altura do provete com ausência das menores partículas de finos, através do meio poroso 40G/40M/20F, em relação com o meio poroso 40G/40M/15F/5f.

Quadro 4.15 – G_{0%SF};1bar;0min;20°C: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral

Grout 0%SF - 1 bar ; 0 min ; 20°C										
Meio poroso	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
	Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
	Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
40G/40M/15F/5f	3190	3257	3269	3239	+	1,10	1,20	1,10	1,14	0,04
40G/40M/20F	3310	3281	3381	3324	+	1,12	1,22	1,19	1,17	0,45
Média	3250	3269	3325	3281	+	1,11	1,21	1,15	1,16	0,25

Comparando as diferentes granulometrias, obtêm-se, tal como visto em 4.3.3, melhores resultados para 40G/40M/20F, o meio poroso que não apresenta menores partículas finas de areia. Ainda assim, as diferenças de resultados entre ambos os meios porosos são pequenas. A excepção está na fatia do topo que apresenta claramente melhores resultados, bem visíveis na resistência à tracção por compressão diametral, mas também na velocidade de ultra-sons. Esta situação é ainda reforçada pelo maior gradiente do ensaio mecânico do meio poroso 40G/40M/20F, visto que o gradiente de 40G/40M/15F/5f é apenas ligeiramente positivo. Tal pode ser explicado pelo facto de o *grout* que chega ao topo ter uma relação água/ligante mais alta, uma vez que vai perdendo água que é absorvida pelas partículas do meio poroso, e como tal é um *grout* com menor parcela líquida, o que permite estabelecer melhores ligações com as partículas. O meio poroso com a presença das menores partículas finas apresenta vazios de menores dimensões, como tal, quanto mais afastado do ponto inicial de injeção, mais difícil é a penetrabilidade do *grout* nesses vazios, já que o *grout* encontra mais resistência ao escoamento. Daí o facto de o gradiente ser apenas ligeiramente positivo.

4.5. Análise complementar de resultados das fatias

Tendo em conta que na realidade a injeção de *grout*, uma técnica de consolidação, tem como objectivo aumentar a resistência ao corte da alvenaria [40], é oportuno avaliar igualmente essa característica nas amostras em estudo. Por isso, apresentam-se em seguida os resultados obtidos nos ensaios de corte para analisar a tensão de resistência ao corte nas diferentes amostras. Os gráficos apresentam os resultados para as três fatias (base, meio e topo) e a média desses valores.

As figuras 4.27 e 4.28 apresentam a comparação de resultados consoante a temperatura de injeção. Na figura 4.27 estão as tensões de resistência ao corte para um *grout* injectado sem tempo de repouso, e na figura 4.28 para um *grout* com tempo de repouso de 60 minutos.

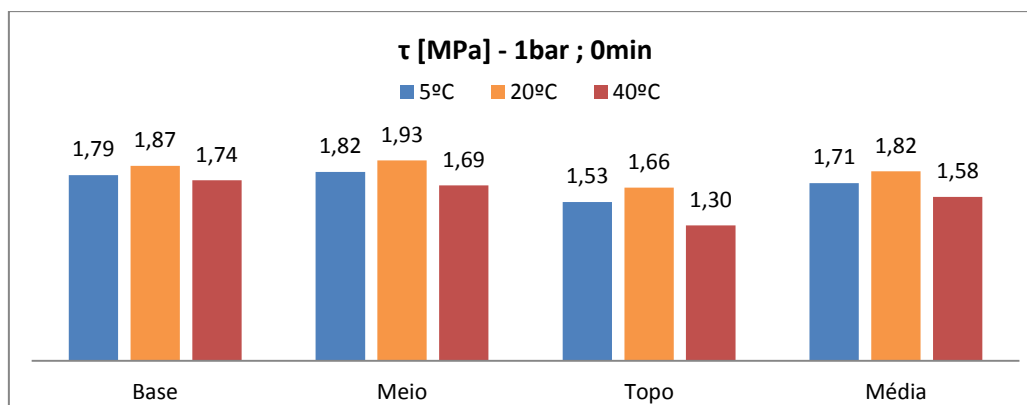


Figura 4.27 – $G_{0\%;1bar;0min}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]

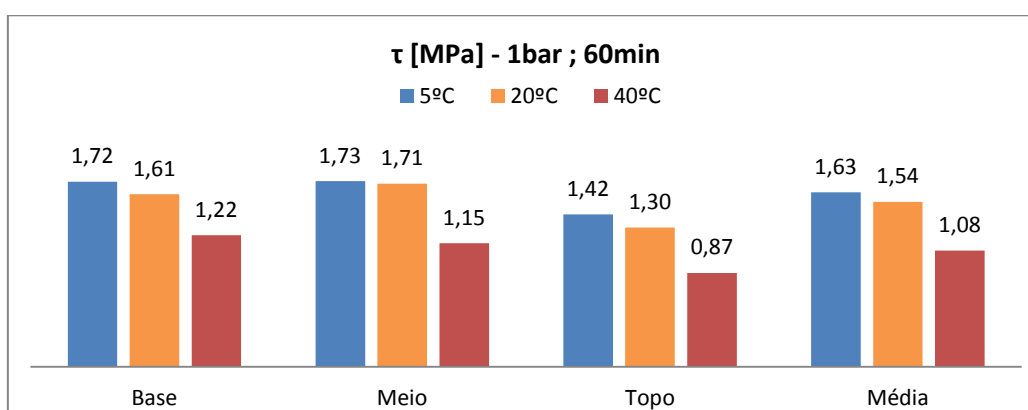


Figura 4.28 – $G_{0\%;1bar;60min}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]

Analisando as tensões de resistência ao corte para um *grout* com 0 minutos de tempo de repouso, pode observar-se que os melhores resultados são os da temperatura de injeção de 20°C, e os piores para 40°C, para todas as fatias de cada provete. Quanto aos resultados para o *grout* com 60 minutos de tempo de repouso, os melhores resultados são dados pelas amostras injectadas à menor temperatura, 5°C, e novamente os piores para 40°C. Estas tendências são as mesmas registadas no ensaio ultra-sónico e no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, visto que este ensaio apresenta os seus resultados em função do imbricamento entre as partículas, isto é, depende da quantidade de *grout* injectado no interior do meio poroso, não variando muito daquilo que é avaliado pelos outros ensaios.

De notar apenas, comparando com os resultados obtidos em 4.4.1.1, que para 60 minutos de tempo de repouso do *grout*, as amostras injectadas à temperatura de 20°C estão mais próximas das de 5°C. Verifica-se ainda que as fatias do topo apresentam sempre resultados inferiores às restantes fatias, o que revela uma menor capacidade de resistência ao corte nas zonas mais afastadas do local de injeção, isto é, onde o *grout* tem mais dificuldade em chegar nas condições ideais de injeção. Este fenómeno é mais visível nas amostras com pior compacidade, nos casos injectados a 40°C.

Os gráficos seguintes apresentam a comparação entre o tempo de repouso dos *grouts* injectados. A figura 4.29 para as amostras injectadas a 5°C, a figura 4.30 para 20°C, e a figura 4.31 para a temperatura de injeção de 40°C.

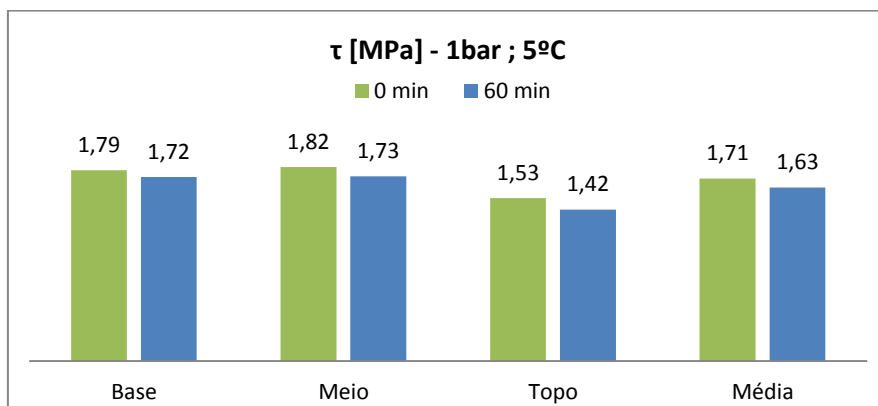


Figura 4.29 – $G_{0\%;1bar;5^{\circ}C}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]

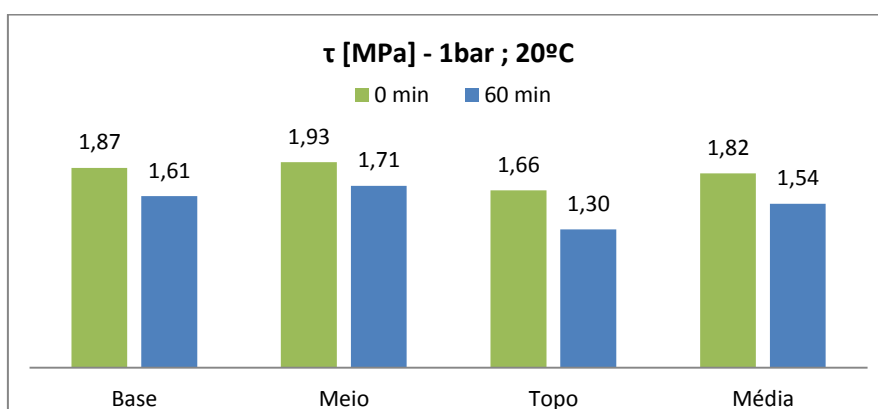


Figura 4.30 – $G_{0\%;1bar;20^{\circ}C}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]

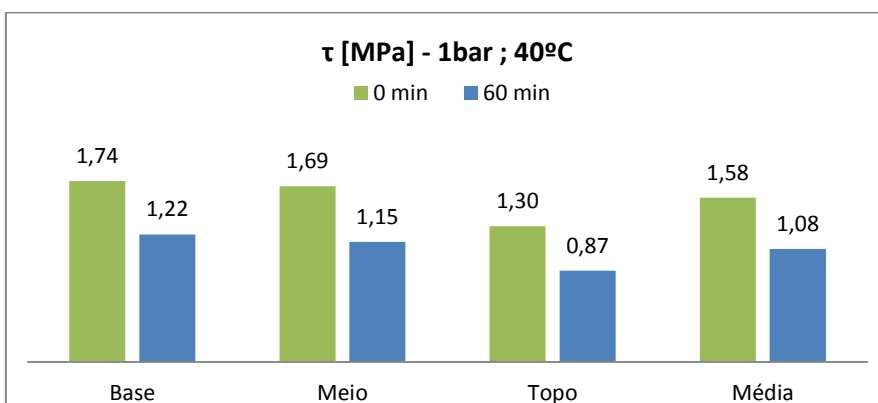


Figura 4.31 – $G_{0\%;1bar;40^{\circ}C}$: Tensão de resistência ao corte [MPa]

As tensões de resistência ao corte dos três gráficos anteriores verificam os resultados obtidos pelo ensaio ultra-sónico e pelo ensaio de resistência à compressão diametral, em que os resultados para

tempo de repouso a 0 minutos e a 60 minutos são semelhantes para 5°C, e piores para o *grout* com maior tempo de repouso nos casos de 20°C, e especialmente 40°C, com uma diferença mais evidente.

À semelhança dos resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral e do ensaio de ultra-sons em que é visível a dependência pela capacidade da injeccção de *grout*, nos valores do ensaio de corte também é notória esta dependência dada a importância da injectabilidade para uma maximização do imbricamento entre as partículas.

4.6. Notas sobre os resultados de resistência à tracção por compressão diametral

Apresentam-se em seguida, de uma forma diferente e em jeito de conclusão, os resultados de resistência à tracção por compressão diametral. Os gráficos seguintes são de fácil análise e permitem comparar duas características da injeccção de *grout*, e perceber de forma muito directa qual a melhor das duas condições de injeccção apresentadas. Os gráficos estão agrupados em dois, sendo que um é referente ao *grout* sem sílica de fumo e o outro do *grout* com 10% de sílica de fumo.

As duas primeiras figuras apresentam a comparação entre diferentes temperaturas de injeccção. Na figura 4.32 pode observar-se a comparação entre 20°C e 5°C, e na figura 4.33 a análise entre 20°C e 40°C.

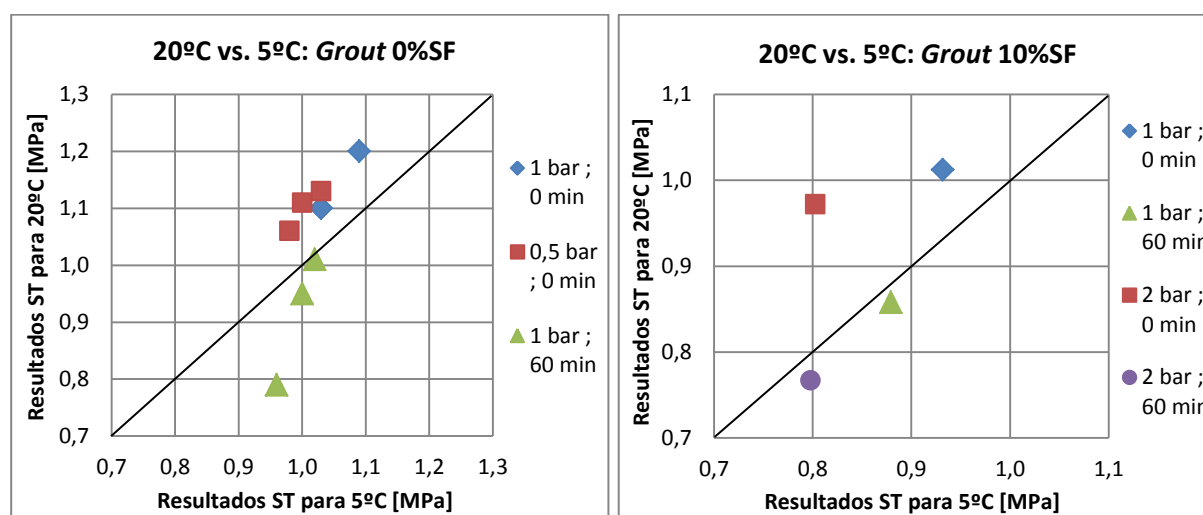


Figura 4.32 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes temperaturas de injeccção, 20°C vs. 5°C: *Grout* 0%SF (esq.) *Grout* 10%SF (dir.)

Começando pela comparação entre as temperaturas de injeccção entre 20°C e 5°C, conclui-se que ambas as temperaturas apresentam os melhores resultados mas em situações diferentes. Para o *grout* sem tempo de repouso, a melhor temperatura de injeccção é a 20°C. No entanto, quando o *grout* é sujeito ao tempo de repouso de 60 minutos, os melhores resultados surgem para uma injeccção mais

fria, a 5°C. Tal verifica-se tanto para o *grout* sem sílica de fumo, como para o *grout* com 10% de sílica de fumo.

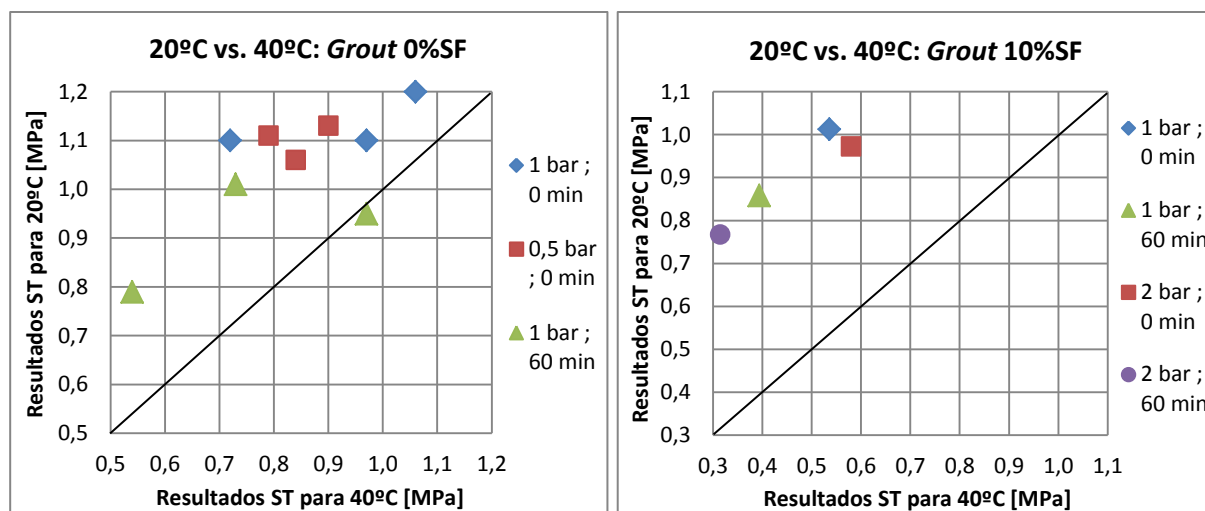


Figura 4.33 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes temperaturas de injeção, 20°C vs. 40°C: *Grout* 0%SF (esq.) *Grout* 10%SF (dir.)

Observando agora a comparação entre as temperaturas de injeção de 20°C e 40°C para ambos os tipos de *grout*, é de notar que as melhores resistências à tracção por compressão diametral se obtêm nas amostras injectadas a 20°C. Estes resultados são ainda mais evidentes quando se trata de uma *grout* com 10% de sílica de fumo.

Seguidamente, na figura 4.34, apresenta-se a comparação das pressões de injeção. Para o *grout* sem sílica de fumo, as pressões são de 1 bar e 0,5 bar. No *grout* com 10% de sílica de fumo, devido às dificuldades encontradas nas injeções de *grout*, substitui-se a pressão menor por uma pressão maior: 2 bar. Assim, esta comparação é entre 1 bar e 2 bar.

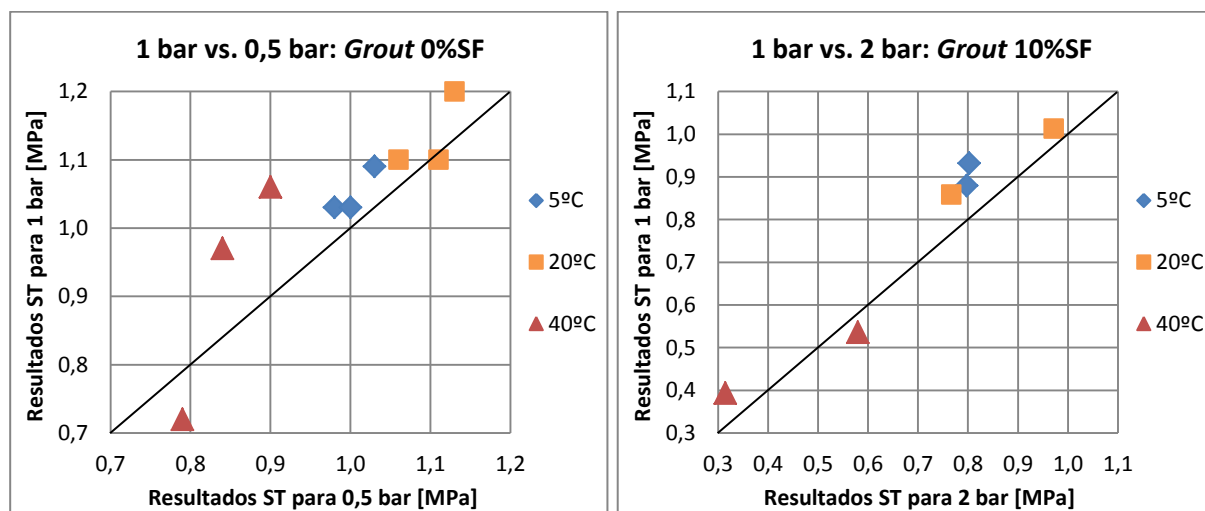


Figura 4.34 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes pressões de injeção: *Grout* 0%SF - 1 bar vs. 0,5 bar (esq.) *Grout* 10%SF - 1 bar vs. 2 bar (dir.)

A análise dos gráficos dita que, na maioria dos casos, se obtêm melhores resultados para a pressão de injeção de 1 bar. No entanto, não se verificam diferenças muito acentuadas entre as diferentes pressões tanto para o caso do *Grout* 0%SF como para o *Grout* 10%SF. Existem apenas dois resultados, um para 0,5 bar e outro para 2 bar, que indicam melhores resistências à tracção por compressão diametral para estas pressões, em vez de para 1 bar. Ambos ocorrem nas amostras de 40°C, que como se analisou anteriormente, é a temperatura de injeção com maiores dificuldades de penetração do *grout* no meio poroso. Portanto, tendo em conta estes problemas na injectabilidade, que se reflectem em injeções heterogéneas ao longo do meio poroso, a pressão de injeção não é o ponto fulcral. Como os valores são tão semelhantes acaba por ser pouco significativo, do ponto de vista da injectabilidade, o valor da pressão.

Por último, na figura 4.35, surge a comparação entre os tempos de repouso do *grout*.

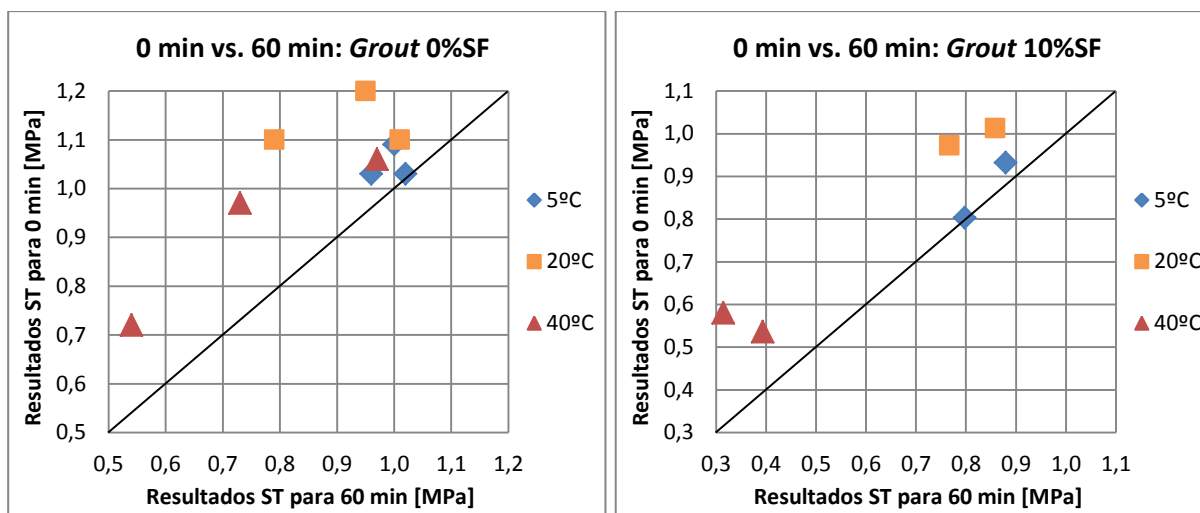


Figura 4.35 – Comparação de resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para diferentes tempos de repouso do *grout*, 0 min vs. 60 min: *Grout* 0%SF (esq.) *Grout* 10%SF (dir.)

Neste caso, não existem muitas dúvidas quanto ao melhor cenário. Os resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral indicam, independentemente das temperaturas de injeção ou dos tipos de *grout*, que o melhor *grout* é aquele que é injectado logo após a sua preparação, isto é, sem tempo de repouso.

5. TOMOGRAFIA ULTRA-SÓNICA

5.1. Introdução

De entre as técnicas de análise não-destrutivas de alvenarias, a tomografia ultra-sónica tem provado ser uma das mais eficazes, da qual se obtém uma resolução de qualidade dos resultados [18, 41].

A tomografia ultra-sónica é uma técnica computacional que utiliza um método iterativo para o processamento de uma grande quantidade de dados recolhidos na superfície externa para reproduzir a estrutura interna de um objecto [18]. Velocidades ultra-sónicas são utilizadas para entrada num programa de computador que desenvolve um modelo tridimensional de distribuição dessas velocidades [55]. O resultado são mapas designados de tomogramas que podem ser apresentados em duas ou três dimensões, como se verá adiante, e fornecem informações sobre o estado interior dos corpos em estudo. Consoante as escalas utilizadas, as referidas imagens permitem perceber a localização das zonas mais compactas (associadas às maiores velocidades ultra-sónicas) e menos compactas (associadas às menores velocidades ultra-sónicas) do corpo em estudo [18, 25].

5.2. Procedimento

5.2.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Como referido em 4.1.1, os resultados obtidos anteriormente do ensaio ultra-sónico foram usados para elaboração dos tomogramas. A criação de tomogramas ultra-sónicos exige um conjunto vasto de medições realizadas ao nível da superfície do provete seguindo uma malha que se deve adequar ao material a analisar (em termos de dimensão e estado de compactidade). No caso dos provetes ensaiados, a malha para o ensaio de ultra-sons é ilustrada na figura 4.3 (vd. 4.1.1). A malha é constituída por seis pontos em cada uma das quatro linhas longitudinais aos provetes e perpendiculares com os topos, distando os pontos de cada linha da malha 4cm entre si e distando o ponto inferior 6cm relativamente à base dos provetes, devido à presença da camada descontínua de 2cm.

De referir que, as medições das velocidades ultra-sónicas utilizadas na obtenção de tomogramas foram realizadas a montante do estudo ultra-sónico das fatias, no capítulo 4, uma vez que esse pressupunha o corte dos provetes e impossibilitava a realização das medições dos tempos de propagação das ondas ultra-sónicas entre pontos localizados em diferentes fatias de cada provete.

5.2.2. Software

Como dito anteriormente, a tomografia ultra-sónica obtém-se através de um programa computacional que processa as velocidades ultra-sónicas registadas nos provetes. Neste estudo recorreu-se ao programa GEOTOMCG, diferente daquele que foi usado por Coelho [25], visto ser uma versão mais recente, que permite o funcionamento com os sistemas operativos actuais e com possibilidade de obter tomogramas em 2D e 3D com uma substancial melhoria na qualidade gráfica comparativamente às imagens provenientes do *software* 3DTOM.

Inicialmente definiu-se um sistema de coordenadas como aquele ilustrado na figura 5.1.

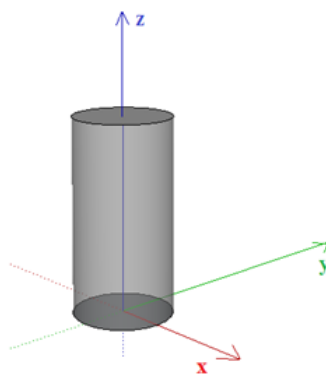


Figura 5.1 – Sistema de coordenadas adoptado

Como se pode constatar, o ponto de origem dos eixos de coordenadas utilizados para o posicionamento dos pontos da grelha do modelo tridimensional localiza-se no centro da base dos provetes. Desta forma, sabendo que os provetes apresentam um diâmetro de 0,152m, a zona onde interessa conhecer a distribuição de velocidades localiza-se entre -0,076m e 0,076m, no que respeita ao posicionamento adoptado dos eixos X e Y. Quanto ao eixo Z, as velocidades ultra-sónicas foram registadas entre 0,04m até 0,24m. De notar que se excluem 0,02m referentes à camada descontínua.

Ainda antes de se iniciar o GEOTOMCG, este requer a criação de um ficheiro de dados do tipo “.3dd” contendo as informações relativas a todas as medições efectuadas. Assim, para cada provete obtiveram-se ficheiros deste tipo através da aplicação *Notepad* (Bloco de notas) do WINDOWS, na qual foram inseridos os dados respectivos, como se apresenta em seguida na figura 5.2. Como se pode observar, na primeira coluna foi atribuído um número a cada trajectória, nas seis colunas seguintes foram indicadas as coordenadas X, Y e Z (em metros) dos transdutores emissor e receptor, respectivamente, referentes à trajectória a que cada linha corresponde e, por fim, o tempo registado (em segundos) obtido na trajectória.

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda									
#	-----Source X. Y. Z-----			---Receiver X. Y. Z----			obs ttime		
1	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.0400	0.0000492		
2	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.0800	0.0000515		
3	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.1200	0.0000558		
4	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.1600	0.0000626		
5	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.2000	0.0000723		
6	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.2400	0.0000953		
7	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.0400	0.0000486		
8	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.0800	0.0000466		
9	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.1200	0.0000493		
10	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.1600	0.0000547		
11	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.2000	0.0000609		
12	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.2400	0.0000714		
13	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.0400	0.0000520		
14	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.0800	0.0000470		
15	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.1200	0.0000461		
16	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.1600	0.0000479		
17	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.2000	0.0000530		
18	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.2400	0.0000625		
19	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.0400	0.0000608		
20	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.0800	0.0000520		
21	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.1200	0.0000480		
22	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.1600	0.0000447		
23	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.2000	0.0000487		
24	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.2400	0.0000527		

Figura 5.2 – Exemplo de um ficheiro de dados “.3dd” de um provete

Após inseridos os dados, cada ficheiro foi devidamente identificado com o provete a que dizia respeito e gravado com a terminação “.3dd”. Posteriormente, para o estudo de cada provete foi aberto no *software* o respectivo ficheiro de dados “.3dd” através do separador *Data – Open data file (*.3dd)*, como ilustrado na figura 5.3.

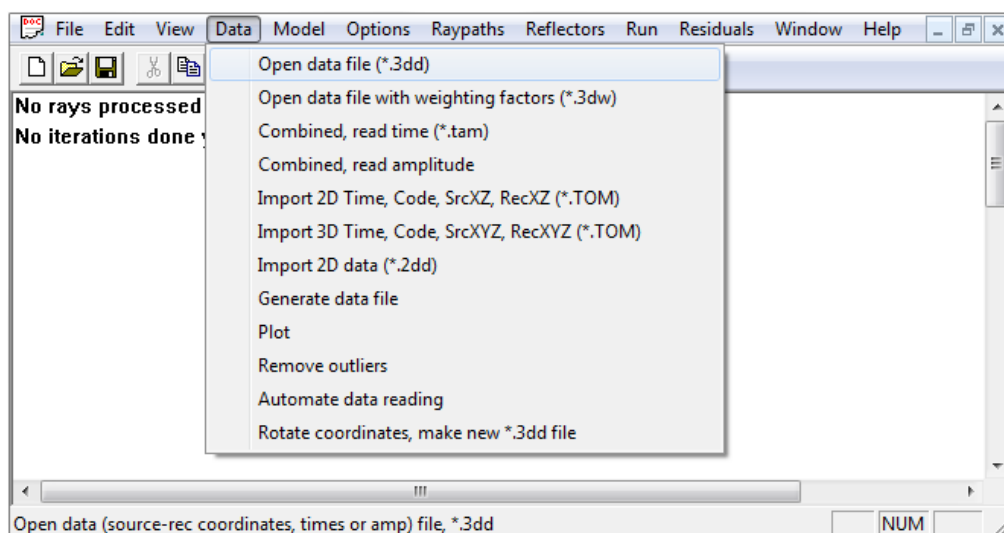


Figura 5.3 – GEOTOMCG: separador *Data*

Em seguida, procede-se à definição do modelo tridimensional a utilizar através do separador *Model – Generate Model*, apresentado na figura 5.4.

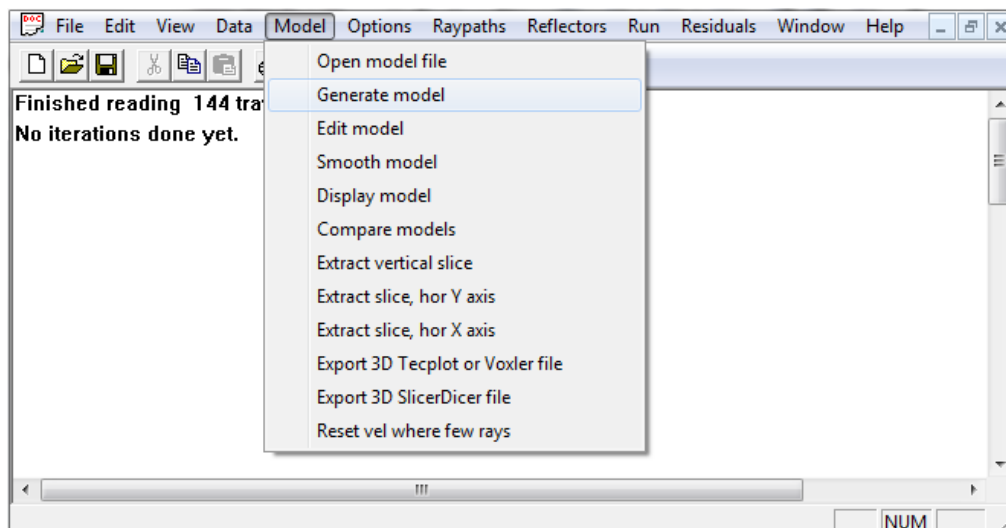


Figura 5.4 – GEOTOMCG: separador Model

O modelo tridimensional é composto por uma grelha de pontos, cujo número e posicionamento pode ser ajustado com as preferências do utilizador, como ilustra a figura 5.5. Assim, define-se a grelha, com uma pequena margem relativamente aos valores das coordenadas definidos anteriormente, de modo a que estes fiquem inseridos no modelo, com valores entre -0,08m e 0,08m, no que respeita ao posicionamento adoptado dos eixos X e Y, e entre 0,02m e 0,26m relativamente ao eixo Z. Quanto ao número de pontos constituintes do modelo tridimensional achou-se por mais adequado 8 pontos no eixo X e Y e 12 pontos no eixo Z.

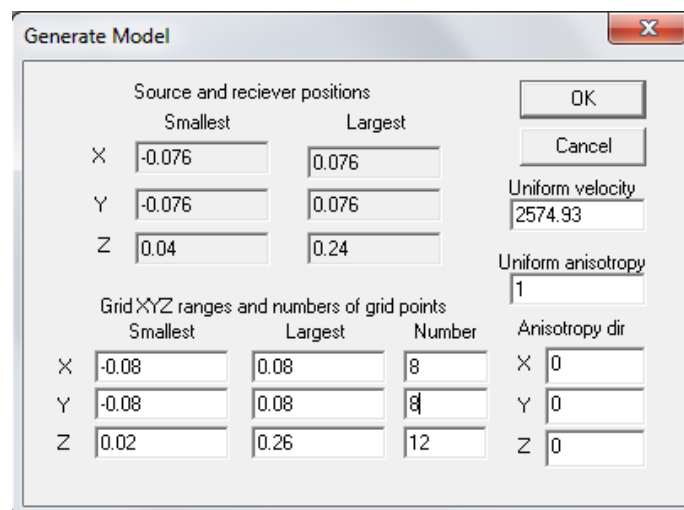


Figura 5.5 – GEOTOMCG: Generate Model

Após a criação do modelo é necessário abri-lo recorrendo ao separador *Model – Open model file*.

Posteriormente procedeu-se à definição dos parâmetros relativos ao processo iterativo através do separador *Options – Inversion Parameters*, como ilustrado na figura 5.6.

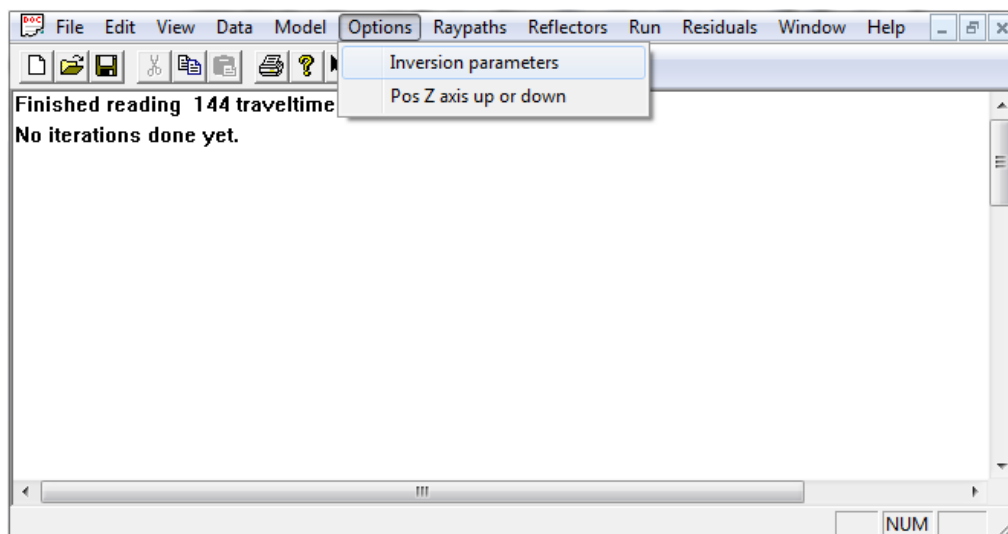


Figura 5.6 – GEOTOMCG: separador *Options*

Para configuração do algoritmo de inversão foram definidas 15 iterações ao todo, como se apresenta na figura 5.7.

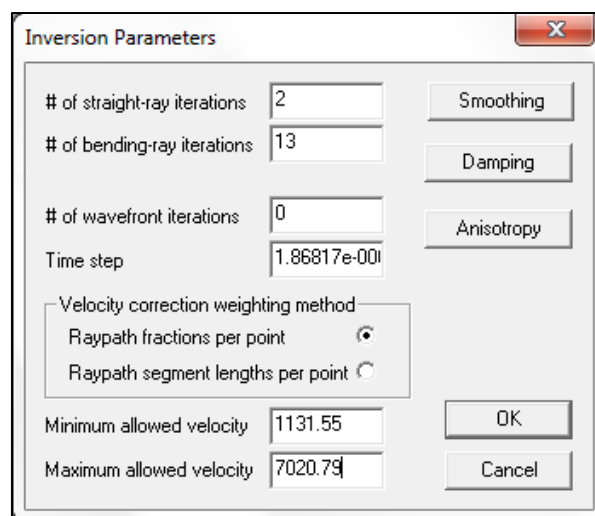


Figura 5.7 – GEOTOMCG: *Inversion Parameters*

Por fim, através do separador *Run – Run standard inversion*, apresentado na figura 5.8, fez-se correr o algoritmo iterativo do *software*, como ilustra a figura 5.9.

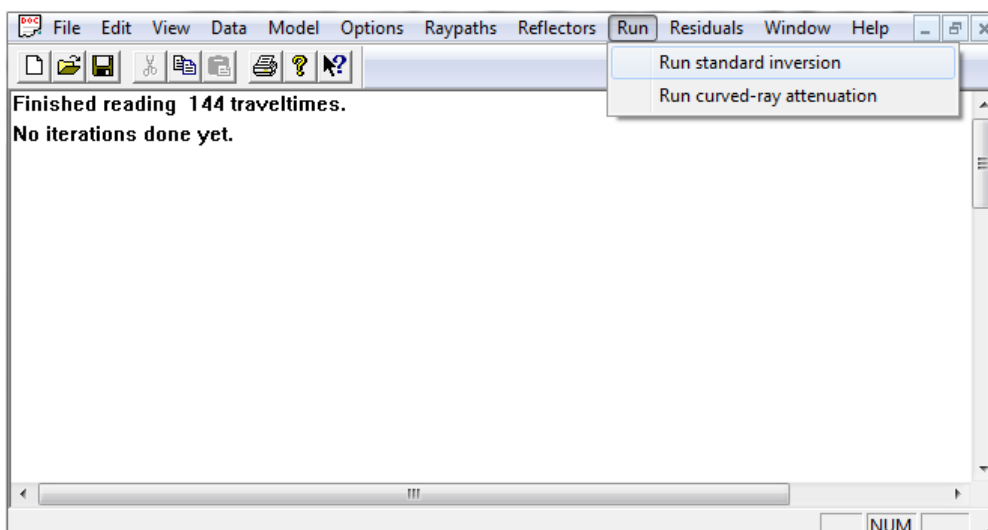


Figura 5.8 – GEOTOMCG: separador *Run*

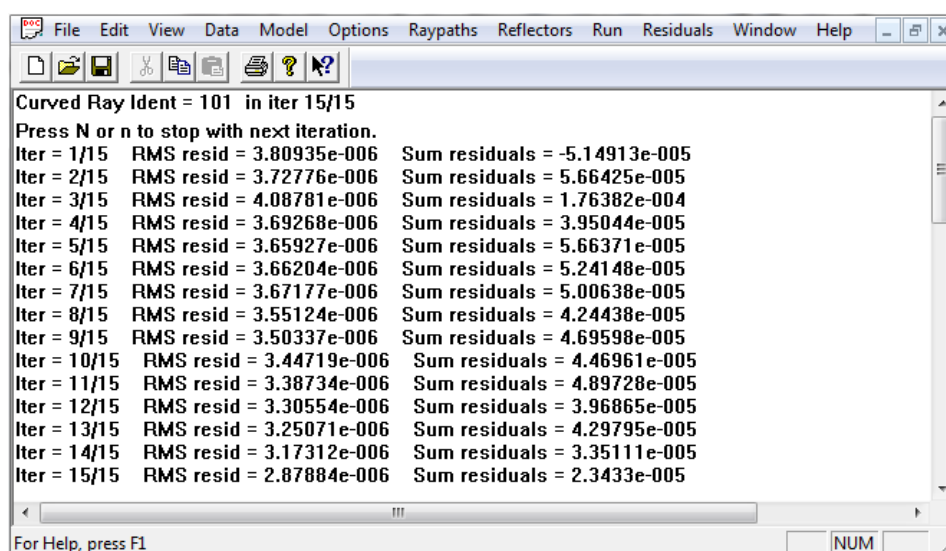


Figura 5.9 – GEOTOMCG: algoritmo iterativo do *software*

Após o processo relativo ao algoritmo iterativo do *software*, resulta um ficheiro no formato “.3dm” que contem toda a informação necessária à criação de tomogramas para a análise do resultado das injeções de *grouts* efectuadas nos provetes.

A obtenção dessas imagens realiza-se através do separador *Model – Display model*, como ilustrado na figura 5.10, do qual se podem retirar tomogramas de um plano do provete, ou seja 2D, ou tomogramas gerais do provete, isto é, em 3D. Podem ainda definir-se as velocidades máxima e mínima e a posição em que se localiza o plano do tomograma em duas dimensões.

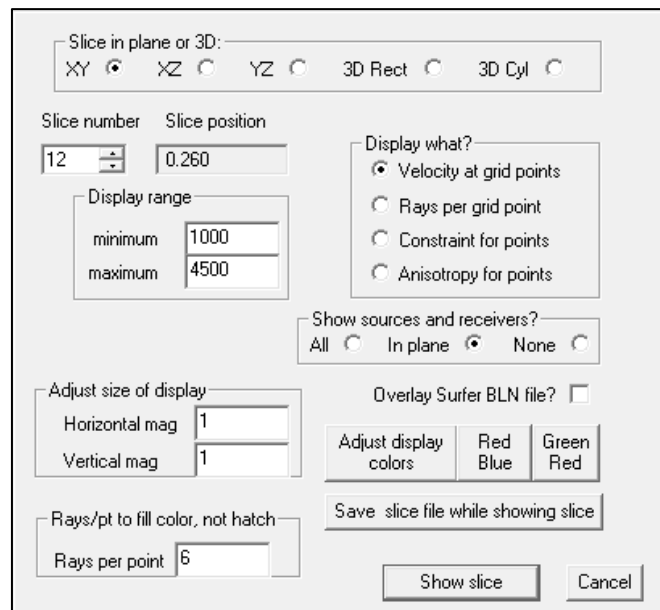


Figura 5.10 – GEOTOMCG: Model display

Contudo, apesar do *software* apresentar tomogramas 3D de qualidade, no que diz respeito aos planos de 2D não fornece imagens com a mesma clareza, tomando uma forma demasiado geométrica, e por isso não espelha da melhor forma o interior do provete. Assim, tendo em conta que após o processo relativo ao algoritmo iterativo realizado no GEOTOMCG resulta um ficheiro no formato “.3dm” que contem toda a informação necessária à criação de tomogramas ultra-sónicos, recorreu-se a um programa gráfico para melhorar os tomogramas de duas dimensões. O programa utilizado foi o SURFER, que requer como entrada o ficheiro “.3dm” e apresenta imagens com mais qualidade e que expõem melhor o estado interior do provete. Em seguida, apresenta-se uma imagem na figura 5.11, que mostra claramente as diferenças entre os dois tipos de imagens provenientes dos respectivos programas.

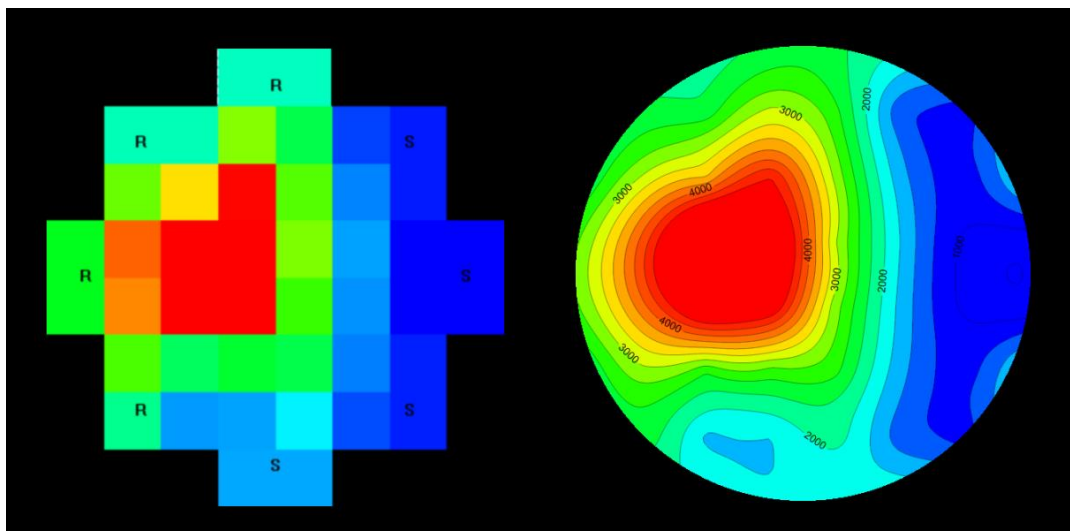


Figura 5.11 – Exemplo de tomograma ultra-sónico de um provete obtido com o GEOTOMCG (esq.) e tomograma do mesmo provete melhorado com o SURFER (dir.)

5.2.3. Métodos e algoritmos

Como já referido, neste processo de obtenção dos tomogramas ultra-sónicos foi realizada inversão de dados através do método iterativo SIRT. A técnica produziu o campo de velocidades na secção transversal da amostra. Outra técnica estabelecida para efectuar tomografia de ultra-sons de uma amostra é o RAYPT (técnica de raio-projecção), uma técnica de optimização concebida para a obtenção de anomalias de uma forma discreta num material de fundo uniforme, que não é o caso dos cilindros estudados e por essa razão não foi utilizado. Os cálculos com SIRT baseiam-se numa grelha rectilínea tridimensional de pontos, com elementos de volume de intervenção ou *voxels*. Os valores de velocidade são especificados nos pontos, e calculados dentro de *voxels* por interpolação linear múltipla. Além disso, num material elástico imperfeito, a atenuação intrínseca provoca uma queda exponencial da amplitude da onda com a distância a partir do ponto de origem, visto que as ondas perdem alguma energia devido ao atrito interno (dependendo da magnitude da perda das propriedades físicas do meio) [23]. Assim, é interessante notar que a apertada grelha de medições utilizada permitiu definir mais precisamente a forma dos vazios, conseguindo-se assim uma resolução mais nítida, com o inconveniente de implicar longas medições e tempos computacionais. Esta observação encaixa bem nos resultados obtidos por Concu *et al.* [27, 28] e Cantini *et al.* [24]. Este último autor percebeu a influência da densidade do mapa de *ray path* (que depende directamente da malha escolhida), com destaque para o benefício de alguma redundância para uma melhor resolução dos tomogramas. Isto permite uma atenuação acústica no mapa de velocidades e uma melhor detecção das heterogeneidades locais.

5.3. Análise de resultados

Nesta secção apresentam-se então os tomogramas ultra-sónicos obtidos segundo o processo descrito anteriormente. Tal como no capítulo anterior, apresentam-se os resultados consoante o parâmetro em estudo, com os tomogramas das secções horizontais referentes a cada uma das fatias (base, meio e topo) reunidos numa só imagem. Posteriormente comparam-se os tomogramas ultra-sónicos, 2D e 3D, com as respectivas fotografias, de modo a avaliar a eficácia desta técnica. Devido à elevada quantidade de resultados apresentam-se apenas neste capítulo as imagens mais reveladoras, fundamentalmente da fatia do topo, relegando as restantes para anexo.

5.3.1. Grout 0%SF

5.3.1.1. Efeito da temperatura

Seguidamente apresentam-se os tomogramas ultra-sónicos das amostras injectadas com diferentes temperaturas, 5°C, 20°C e 40°C, com objectivo de avaliar a influência da temperatura de injeção no estado interior das amostras. Na figura 5.12 podem observar-se os resultados para a pressão de injeção de 1 bar e *grout* sem tempo de repouso.

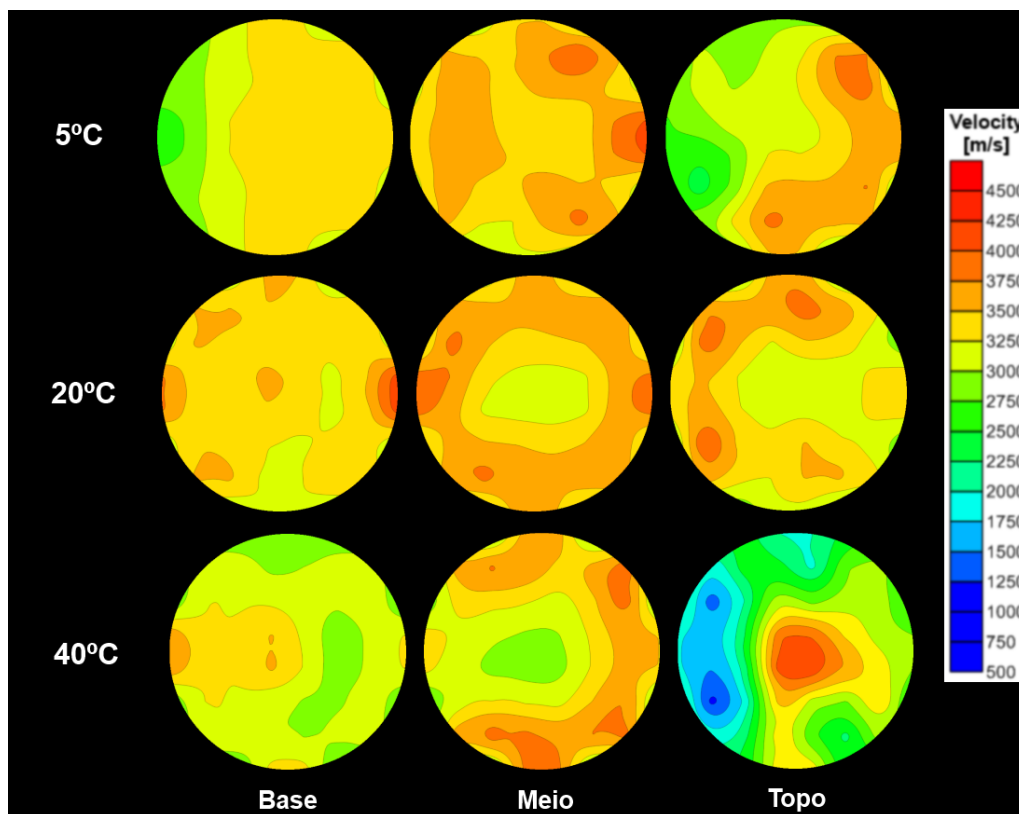


Figura 5.12 – $G_{0\%SF;1bar;0min}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 5°C, 20°C e 40°C

Analisando os tomogramas presentes na figura 5.12, pode observar-se que as fatias respeitantes ao provete injectado à temperatura de 20°C são aquelas em que se obtêm melhores resultados, visto que apresentam constantemente cores amareladas e alaranjadas, que correspondem a velocidades ultra-sónicas acima de 3000 m/s. Pelo contrário, as fatias em que a temperatura de injeção foi de 40°C são as que apresentam piores resultados, visto que se pode observar nos tomogramas a presença da cor verde correspondente a velocidades ultra-sónicas inferiores a 3000 m/s, e na fatia do topo os tons azulados respeitantes a velocidades de ultra-sons inferiores as 2000 m/s. Estes tomogramas estão de acordo com os resultados obtidos anteriormente, quer para o ensaio de ultra-sons, quer para os ensaios mecânicos.

Tal como os resultados obtidos em 4.4.1.1, as fatias do meio parecem ser aquelas em que se obtêm melhores injectabilidade, isto é, maiores compacidades, traduzidas pelos melhores resultados dos ensaios realizados. A explicação pode estar no facto de na fatia da base, devido à proximidade com o local da injeção, gerar-se uma certa turbulência no seio do meio poroso, no momento da injeção de *grout*, provocando uma heterogeneidade de injeção. Já na fatia do topo, os piores resultados devem-se às piores condições do *grout* no momento da injeção, anteriormente descritas, que se tornam mais relevantes no local mais longínquo em relação ao ponto de injeção. Este caso é mais visível no pior cenário, ou seja, a fatia do topo da amostra injectada a 40°C.

Em seguida, de modo a comprovar a eficácia da tomografia ultra-sónica, apresentam-se os

tomogramas anteriores das fatias do topo com a respectiva fotografia, das amostras com temperaturas de injeção de 5°C na figura 5.13, 20°C na figura 5.14, e 40°C na figura 5.15.

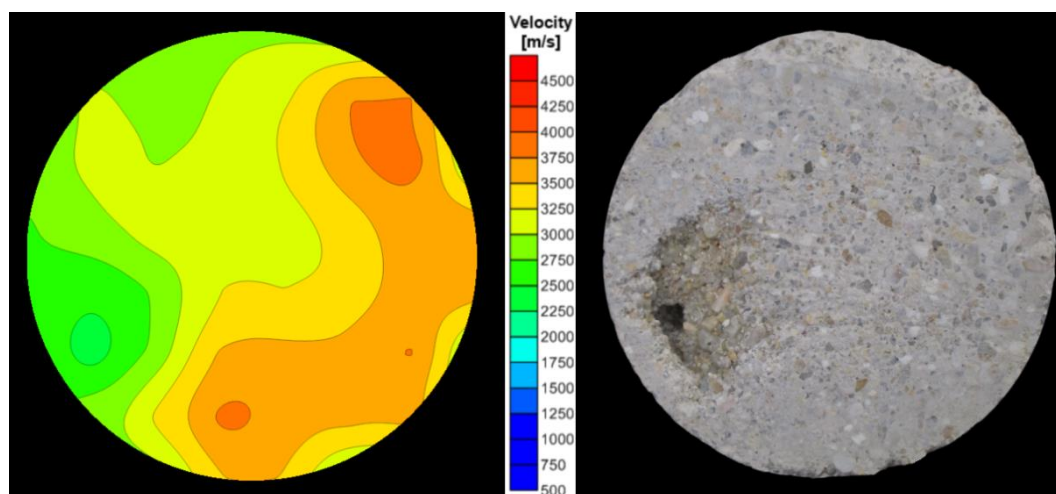


Figura 5.13 – $G_0\%$; 1bar; 0min; 5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

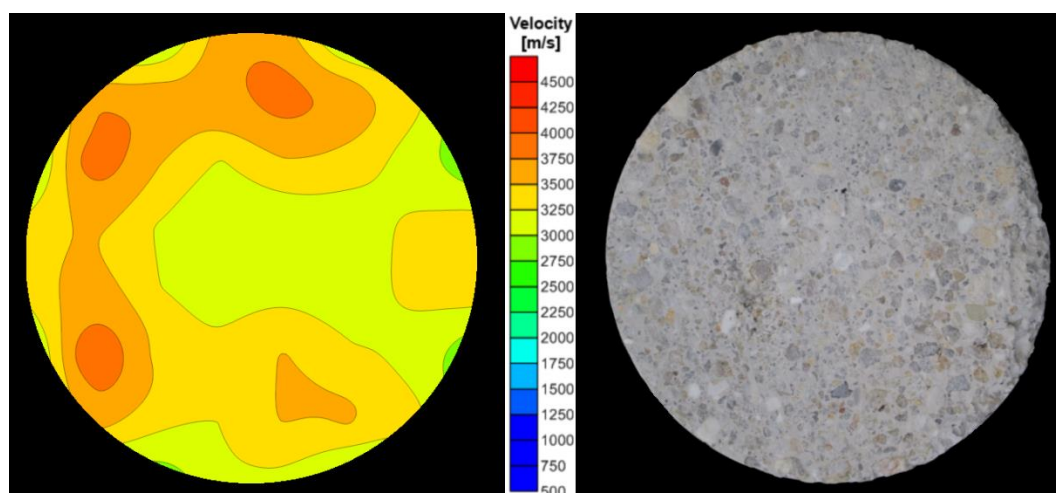


Figura 5.14 – $G_0\%$; 1bar; 0min; 20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

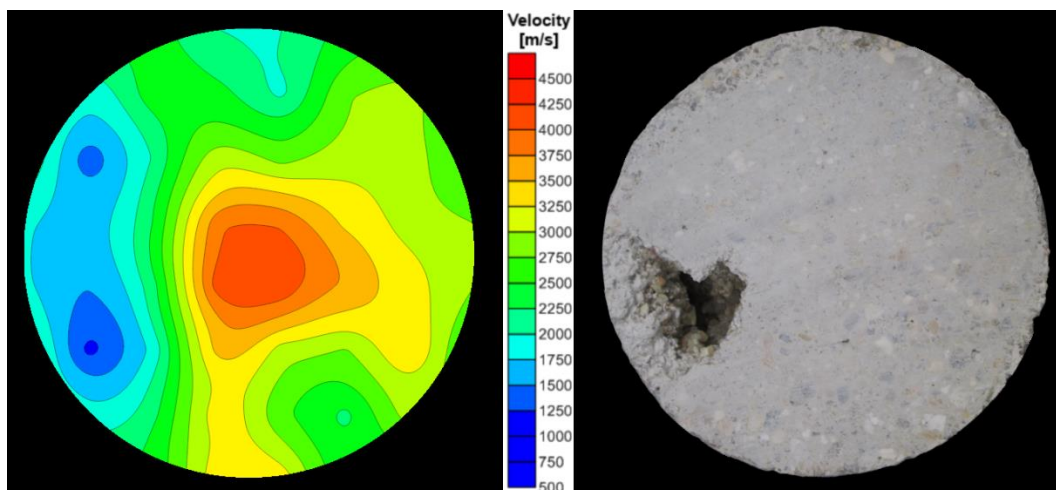


Figura 5.15 – G₀%;1bar;0min;40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

É de notar a grande semelhança entre os tomogramas obtidos nos planos correspondentes às fotografias com as quais se comparam, principalmente no caso da amostra de 40°C, através do preenchimento da zona evidenciada na fotografia por vazio, com as cores azuis correspondentes a menores velocidades ultra-sónicas. No entanto, também as imagens correspondentes às amostras de 5°C e 20°C de temperaturas de injeção apresentam semelhanças com as respectivas fotografias, visto apresentarem cores correspondentes a melhores velocidades ultra-sónicas, isto é, zonas compactas, à excepção do pequeno vazio da amostra de 5°C, que é detectado, apresentando a única zona com cor mais azulada.

As restantes imagens referentes às fatias da base e do meio com os tomogramas ultra-sónicos e respectivas fotografias encontram-se nas figuras A.1 e A.2 para as amostras com injeção a 5°C, figuras A.3 e A.4 para 20°C, e figuras A.5 e A.6 para a temperatura de 40°C.

Na figura 5.16 pode observar-se os tomogramas referentes às amostras injectadas com temperaturas 5°C, 20°C e 40°C, para a pressão de injeção de 0,5 bar.

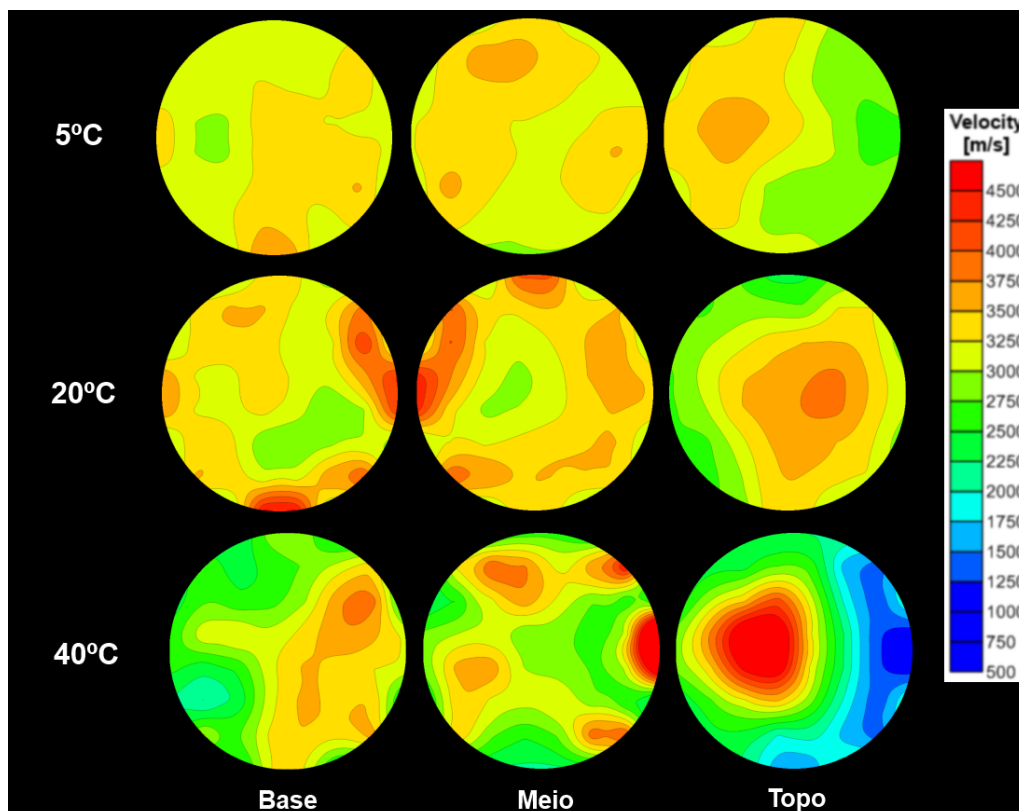


Figura 5.16 – $G_{0\%SF;0,5bar;0min}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultrasónicas nas amostras de 5°C, 20°C e 40°C

Nas amostras injectadas com menor pressão, 0,5 bar, os resultados são iguais ao caso anterior para pressão de 1 bar. Os melhores tomogramas parecem ser os das amostras com temperatura de injeção de 20°C, seguidos de perto pelos de 5°C, e por último, as amostras injectadas a 40°C.

Na secção seguinte abordam-se com mais detalhe estes resultados comparando as pressões de injeção, e a respectiva comparação entre os tomogramas e as fotografias.

A figura 5.17 apresenta os tomogramas referentes às amostras injectadas com temperaturas 5°C, 20°C e 40°C, para um *grout* injectado com 60 minutos de tempo de repouso.

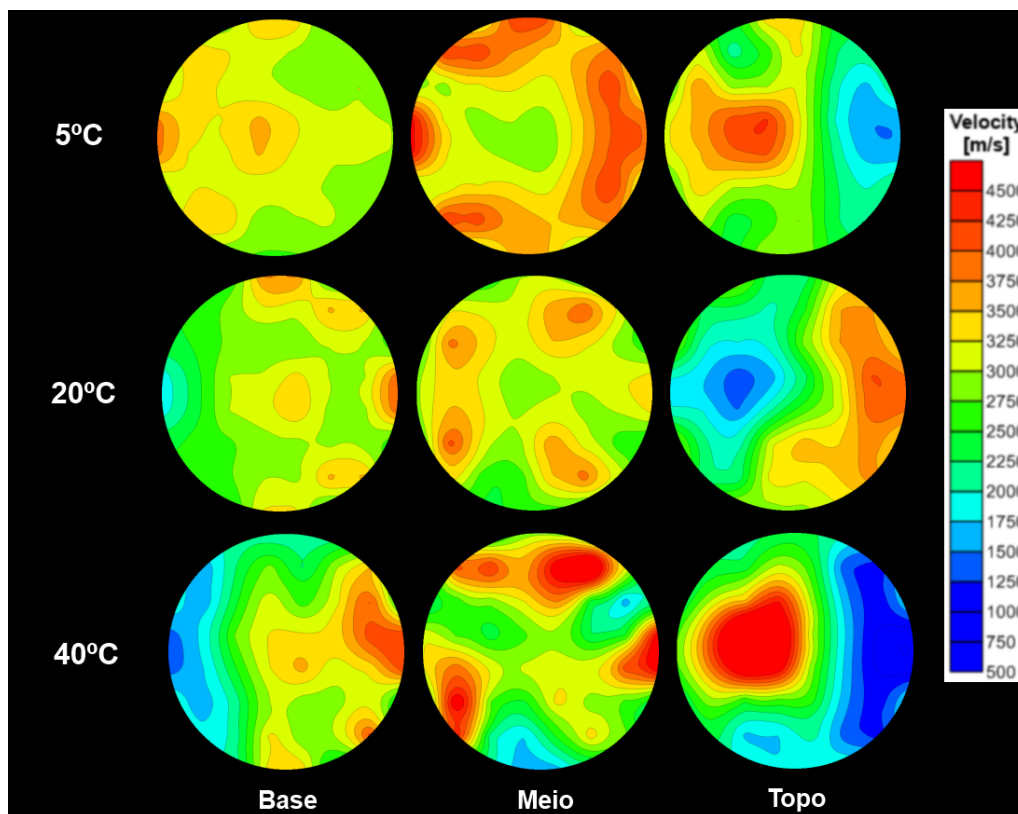


Figura 5.17 – $G_{0\%SF;1bar;60min}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 5°C, 20°C e 40°C

Numa primeira observação dos tomogramas dos provetes com tempo de repouso de 60 minutos, destaca-se a presença de maior quantidade de zonas com cor azul, que representam áreas com baixas velocidades ultra-sónicas, que normalmente significam zonas com vazios. Este facto vai de encontro aos resultados obtidos nos ensaios apresentados anteriormente, nos quais se verificam os resultados mais baixos comparativamente com as restantes amostras sem sílica de fumo. Os resultados obtidos em 4.4.1.1 estão igualmente em consonância com os tomogramas ultra-sónicos, sendo os melhores os das amostras a 5°C, seguidos por aqueles que tiveram temperatura de injeção de 20°C, e por último os de 40°C.

Como explicado anteriormente em 4.3.1.1 e 4.4.1.1, para maiores temperaturas existe maior floculação do *grout*, ou seja, há mais tendência para as partículas sólidas de *grout* se agruparem ao longo do tempo, dado que o *grout* está em repouso, o que leva a que o *grout* tenha menor capacidade de injectabilidade. A menor injectabilidade significa que as amostras apresentam menor compacidade, que se traduz em menores velocidades ultra-sónicas apresentadas pelos tomogramas das amostras injectadas a 20°C e, especialmente, a 40°C.

Como o *grout* com 60 minutos de repouso se encontra mais floculado, e por isso, mais denso, originam-se condições para a ocorrência de um fenómeno, descrito anteriormente para o *grout* com sílica de fumo, mas que pode igualmente ocorrer sem a presença desta adição. Este fenómeno é a filtração do *grout*, que ocorre quando um aglomerado de partículas de *grout*, devido a uma capacidade

de injeção que não é ideal, se acumula na entrada ou no interior de um poro ou vazio, impedindo o fluxo do *grout*. A figura 5.18 apresenta fotografias de alguns exemplos deste fenómeno no interior das amostras injectadas com *grout* com tempo de repouso de 60 minutos.



Figura 5.18 – Fenómenos de filtração do *grout* no interior de algumas amostras

5.3.1.2. *Efeito da pressão*

Nesta secção pretende-se agora averiguar qual a melhor pressão de injeção. As figuras seguintes apresentam a comparação entre as amostras injectadas à pressão de 1 bar e de 0,5 bar. A figura 5.19 apresenta os tomogramas para a injeção a 5°C, e a figura 5.20 para 20°C.

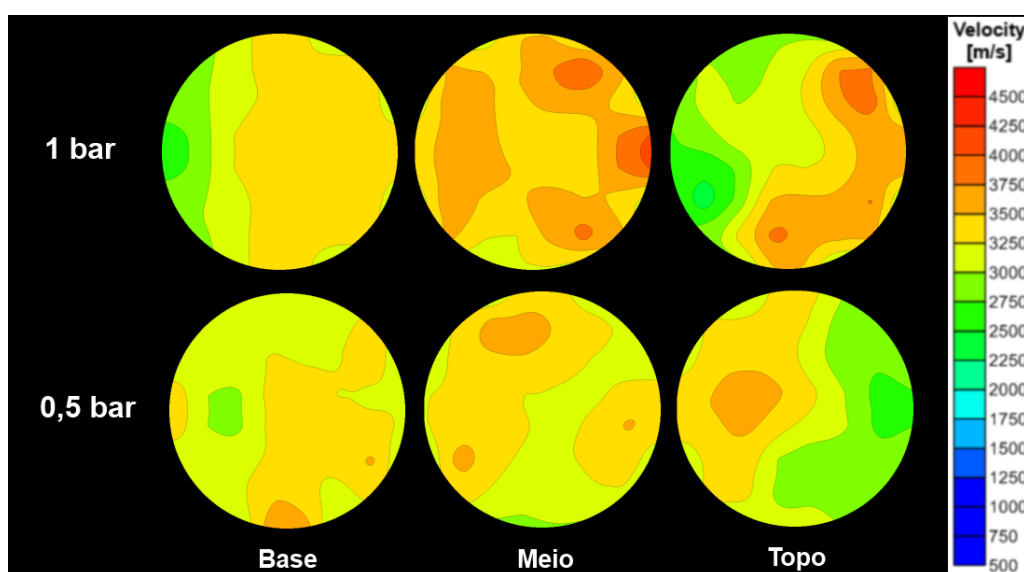


Figura 5.19 – $G_{0\%SF;0min;5^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 1 bar e 0,5 bar

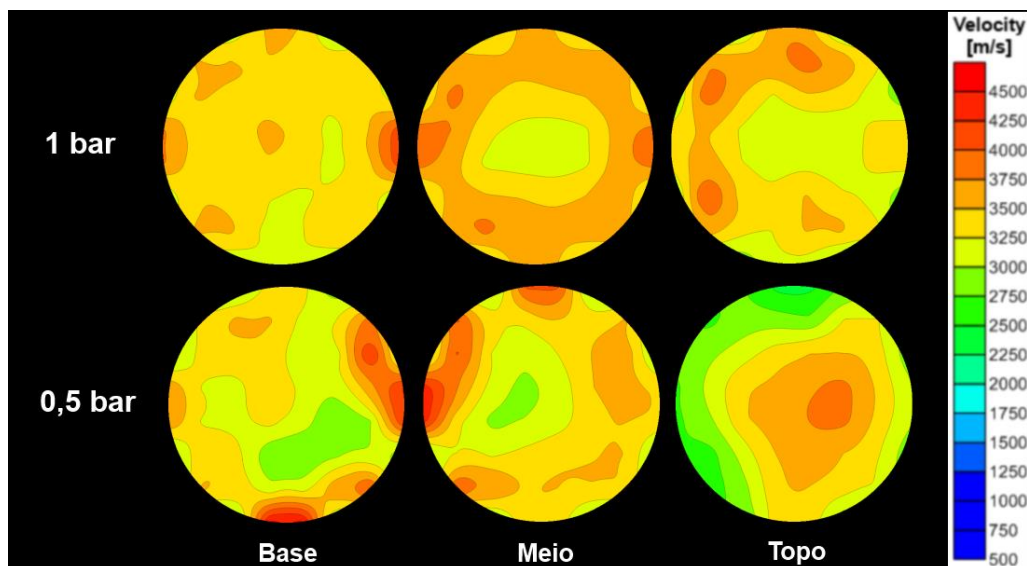


Figura 5.20 – $G_{0\%SF;0min;20^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 1 bar e 0,5 bar

Analisando os tomogramas das amostras injectadas a $5^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$, não se notam grandes diferenças entre a pressão de 1 bar e 0,5 bar. Embora os resultados obtidos em 4.3.1.2 e 4.4.1.2 dêem vantagem à pressão de injeção de 1 bar, mostram também que as diferenças entre ambas as pressões são mínimas, daí não ser evidente destacar quais os melhores tomogramas. As imagens seguintes com as comparações entre os tomogramas e as respectivas fotografias das fatias do topo da amostra de $5^{\circ}C$ (figura 5.21) e $20^{\circ}C$ (figura 5.22) ajudam a comprová-lo.

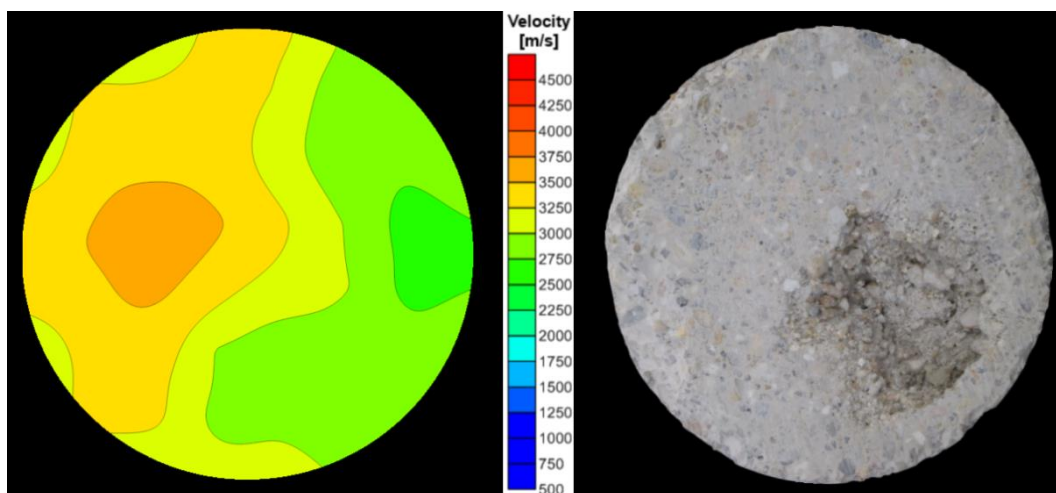


Figura 5.21 – $G_{0\%};0,5bar;0min;5^{\circ}C$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

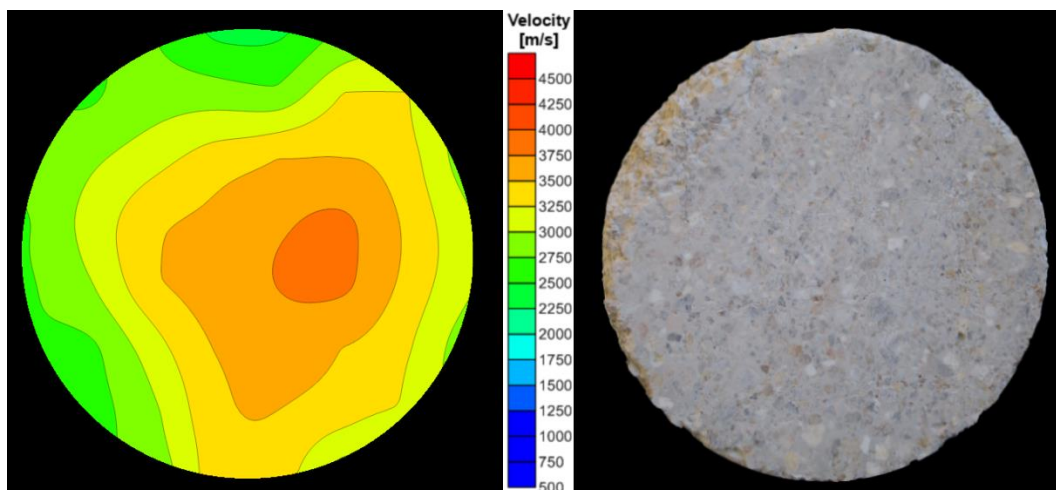


Figura 5.22 – $G_{0\%};0,5\text{bar};0\text{min};20^\circ\text{C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

Tal como a fotografia apresentada na figura 5.14 para a amostra de 1 bar e 20°C , a fotografia da amostra a 0,5 bar mostra uma injeção quase perfeita. O mesmo se constata para as amostras injectadas a 5°C presentes nas figuras 5.13 e 5.21, para 1 bar e 0,5 bar, respectivamente, com apenas uma falha superficial e de pequenas dimensões. De notar que, tal como visto em 4.4.1.2, a menor pressão parece conseguir-se uma injeção mais estável e obter menores variações entre as fatias, isto é, uma injeção mais homogénea em função da altura do provete.

As imagens das fatias da base e do meio com os tomogramas ultra-sónicos e respectivas fotografias encontram-se nas figuras A.7 e A.8 para os provetes com temperatura de injeção de 5°C , e figuras A.9 e A.10 para 20°C .

Por último nas comparações entre as pressões de injeção, apresentam-se na figura 5.23, os tomogramas referentes às amostras injectadas à temperatura de 40°C .

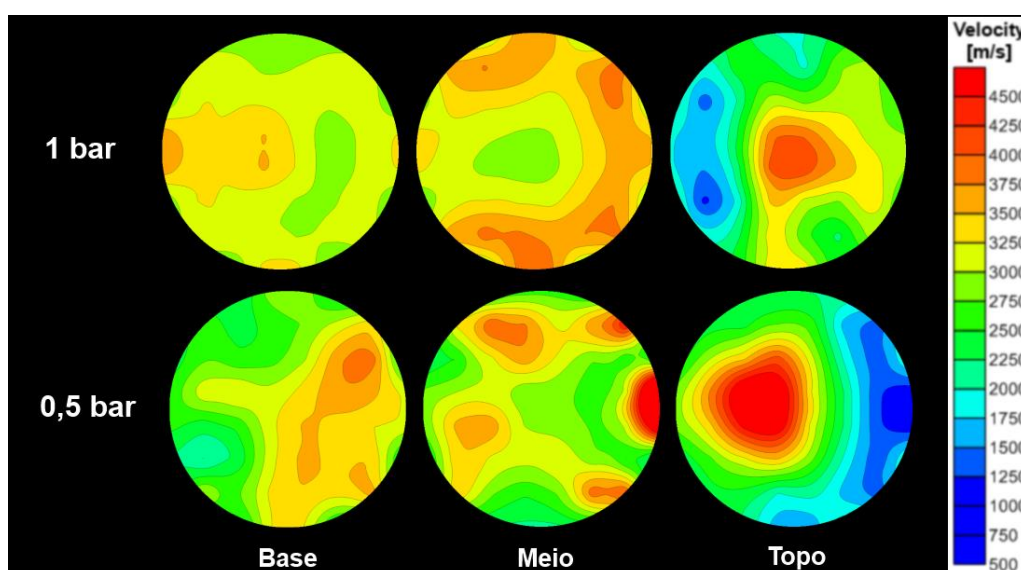


Figura 5.23 – $G_{0\%SF};0\text{min};40^\circ\text{C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 1 bar e 0,5 bar

Nas amostras com 40°C de temperatura de injeção já parecem existir mais alguns sinais de pior injeção no caso da menor pressão, visto que na fatia da base e do meio se podem observar pequenas zonas a azul claro, que não se constata no caso das amostras de 1 bar. Na fatia do topo, apesar de surgir uma área com a cor vermelha, que indica velocidades ultra-sónicas acima dos 4000 m/s, esta não compensa o facto de existir uma grande zona com as cores azuis, que como as figuras 5.24 e 5.25 ilustram, representam um grande vazio em que o *grout* não penetrou no meio poroso. Aliás, a causa para a grande mancha vermelha registada no tomograma pode estar no facto de, não conseguindo o *grout* penetrar na zona em que acabou por surgir o vazio, acumular-se na zona oposta, dando origem a elevados valores de velocidades de ultra-sons.

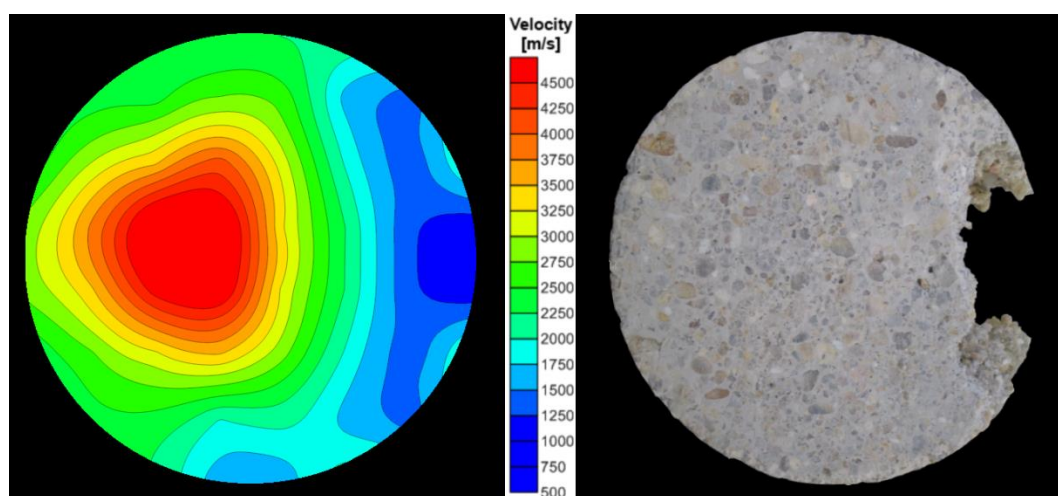


Figura 5.24 – $G_{0\%}; 0,5\text{bar}; 0\text{min}; 40^\circ\text{C}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

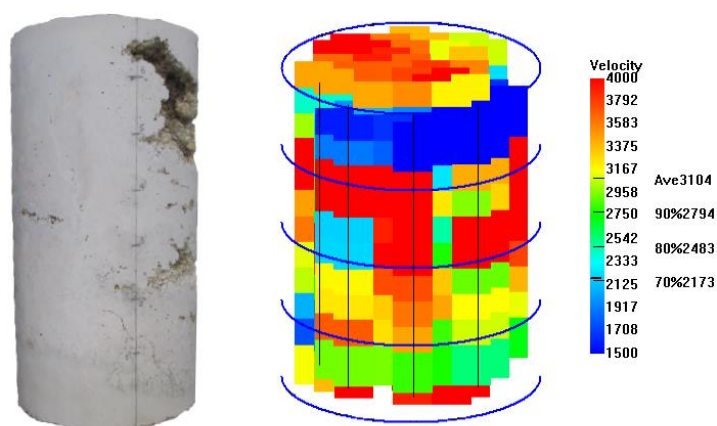


Figura 5.25 – $G_{0\%SF}; 0,5\text{bar}; 0\text{min}; 40^\circ\text{C}$: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra

Os tomogramas das figuras 5.24 e 5.25 apresentam um grande nível de semelhança com as respectivas fotografias, provando que a tomografia ultra-sónica é capaz de detectar eficazmente os vazios correspondentes a áreas não injectadas por *grout* no interior do meio poroso.

Para a fatia da base e do meio, os tomogramas ultra-sónicos com respectiva fotografia encontram-se em anexo nas figuras A.11 e A.12.

5.3.1.3. Efeito do tempo de repouso do grout

Procura-se agora avaliar a influência de outro parâmetro em estudo, o tempo de repouso do *grout*. A figura 5.26 apresenta para a temperatura de 5°C, a comparação entre os tomogramas das amostras injectadas sem tempo de repouso e com 60 minutos de tempo de repouso.

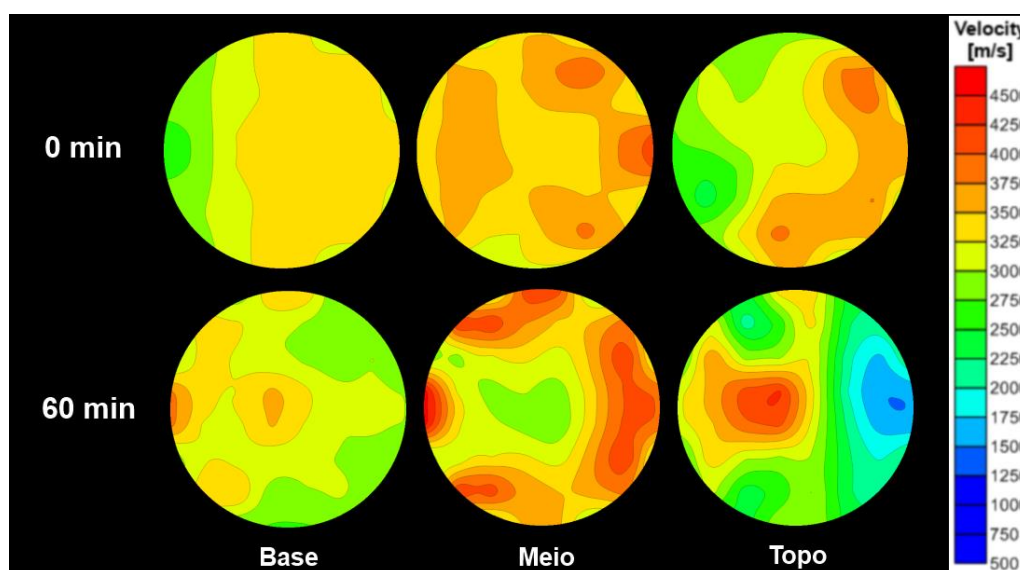


Figura 5.26 – $G_{0\%SF;1bar;5^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 0min e 60min

Analisando as amostras injectadas a 5°C, não se observam grandes diferenças entre os tomogramas relativos às amostras de *grout* com tempos de repouso de 0 minutos e 60 minutos, o que está em consonância com os resultados obtidos em 4.3.1.3 e 4.4.1.3. Apenas o tomograma referente à fatia do topo do *grout* com tempo de repouso de 60 minutos apresenta uma área a azul, indicando menores velocidades ultra-sónicas registadas. Tal pode ser explicado por um maior estado de floculação que o *grout* apresenta, embora, como se viu anteriormente, este fenómeno não seja tão evidente como para temperaturas de injeção mais altas.

As fotografias das figuras 5.13 e 5.27 ajudam a comprovar as semelhanças verificadas, entre os *grouts* sem e com tempo de repouso, na tomografia ultra-sónica e nos restantes ensaios realizados. Ambas apresentam pequenos vazios na face superior da fatia do topo, em que o *grout* não penetrou de forma ideal.

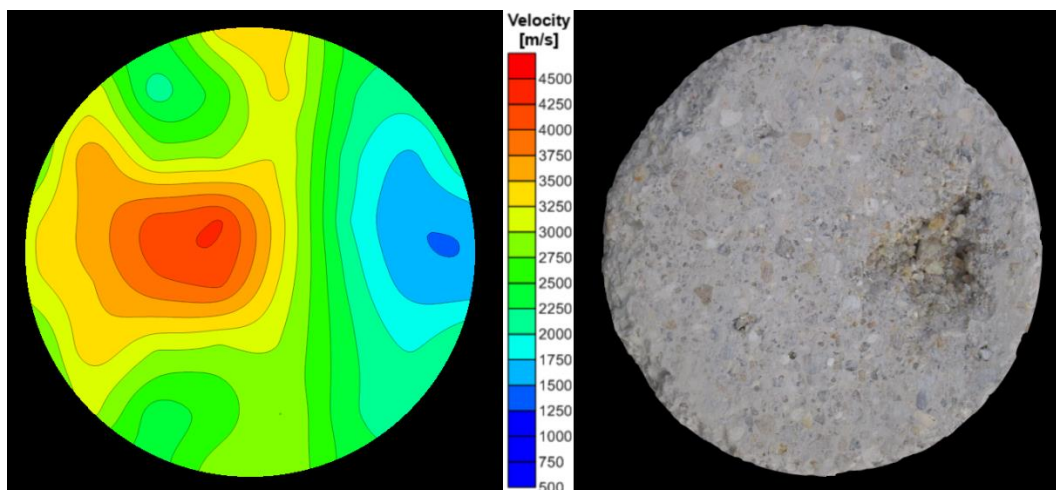


Figura 5.27 – $G_0\%$;1bar;60min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

As imagens referentes às fatias da base e do meio com a comparação entre tomograma ultra-sónico e fotografia respectiva encontram-se em anexo nas figuras A.13 e A.14.

Seguidamente apresentam-se os tomogramas ultra-sónicos de comparação entre os tempos de repouso do *grout* referentes às temperaturas de injeção de 20°C e 40°C, nas figuras 5.28 e 5.29, respectivamente.

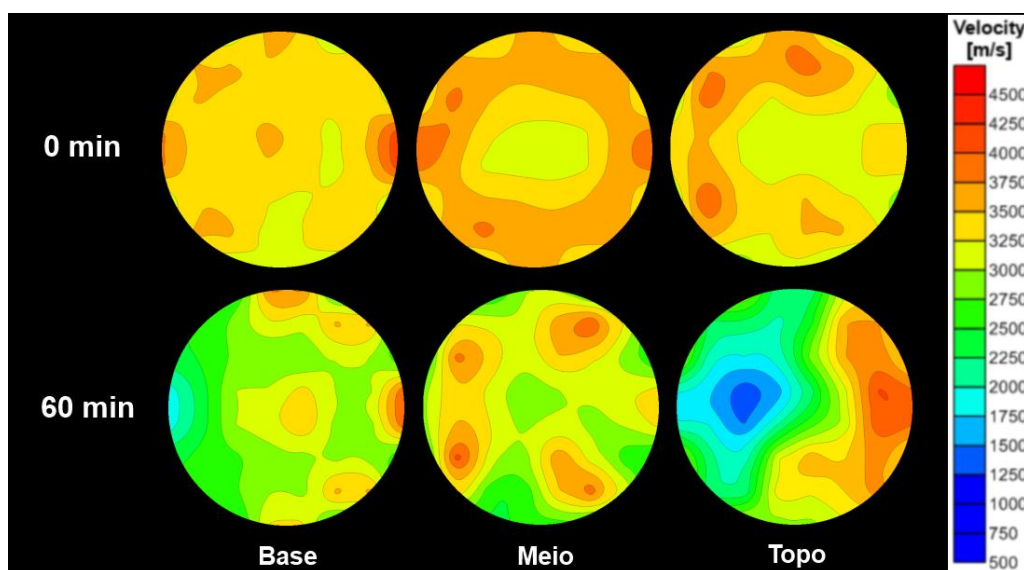


Figura 5.28 – $G_0\%$ SF;1bar;20°C: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 0min e 60min

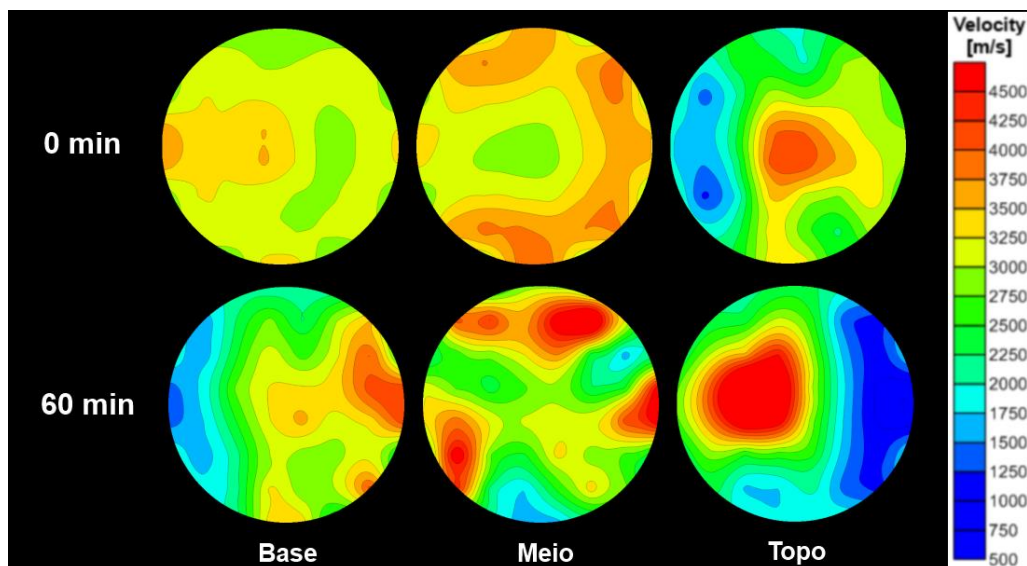


Figura 5.29 – $G_{0\%SF;1bar;40^{\circ}C}$: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de 0min e 60min

Para as temperaturas de injeção de 20°C e 40°C já se podem constatar maiores diferenças entre as amostras com *grout* com e sem tempo de repouso. O efeito que estas temperaturas causam na aglomeração de partículas num *grout* com tempo de repouso de 60 minutos, torna o *grout* menos fluido, menos injectável, o que se reflecte numa menor compacidade do meio poroso em certas áreas, traduzido em menores velocidades ultra-sónicas registadas nos tomogramas. Assim, nestes tomogramas das amostras injectadas a 20°C e 40°C com *grout* que teve 60 minutos de tempo de repouso, surgem diversas zonas representadas com a cor azul, que indicam a presença de vazios, por vezes de grandes dimensões. Tal pode ser comprovado pelas imagens apresentadas nas figuras 5.30 e 5.31, respeitantes à amostra de 20°C, e figuras 5.32 e 5.33, referentes à amostra com 40°C de temperatura de injeção.

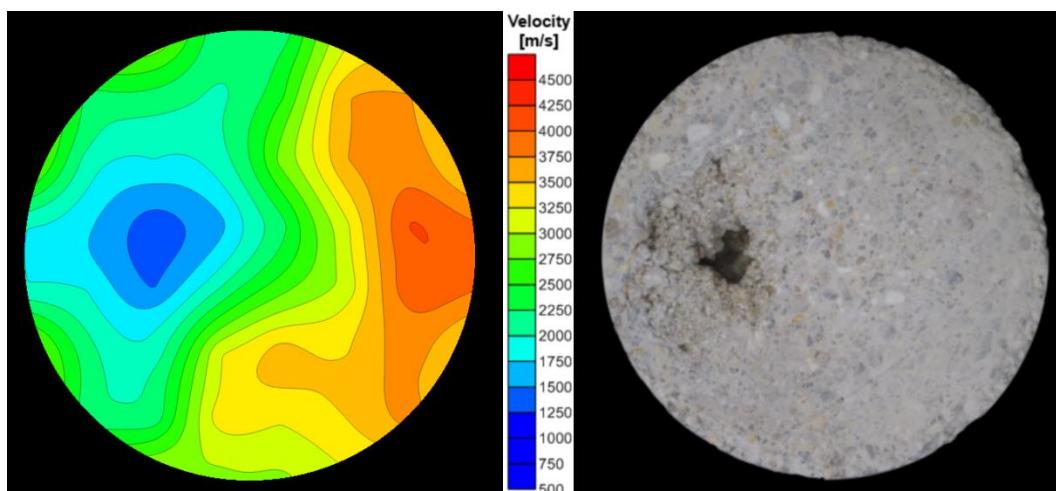


Figura 5.30 – $G_{0\%};1bar;60min;20^{\circ}C$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

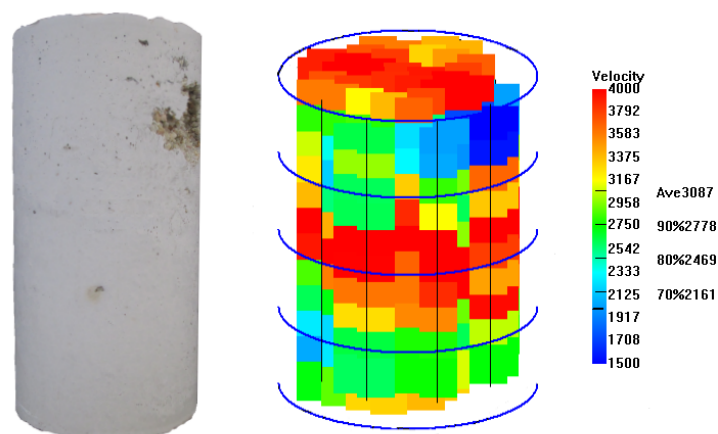


Figura 5.31 – $G_{0\%SF;1bar;60min;20^{\circ}C}$: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra

À semelhança do que acontece no caso da amostra de 0,5 bar e $40^{\circ}C$ (figura 5.24), a fatia do topo da amostra injectada a $40^{\circ}C$ e *grout* com tempo de repouso de 60 minutos, também apresenta uma área onde se registam velocidades ultra-sónicas acima dos 4000 m/s (cor vermelha) e outra com velocidades inferiores a 1000 m/s (zona azul). A explicação dada para tal ocorrência, de não tendo o *grout* capacidade para penetrar na zona representada a azul, acumular-se na zona oposta, dando origem a elevados valores de velocidades de ultra-sons, parece ser válida visto que as fotografias comprovam a existência de um vazio de grandes dimensões. Estas imagens estão presentes na figura 5.32, que apresenta o tomograma ultra-sónico da fatia do topo em 2D e respectiva fotografia, e na figura 5.33, em que se pode visualizar na fotografia do provete inteiro, o grande volume de meio poroso não injectado por *grout*. Que se encontra igualmente representado no tomograma 3D pelas baixas velocidades ultra-sónicas indicadas pela cor azul.

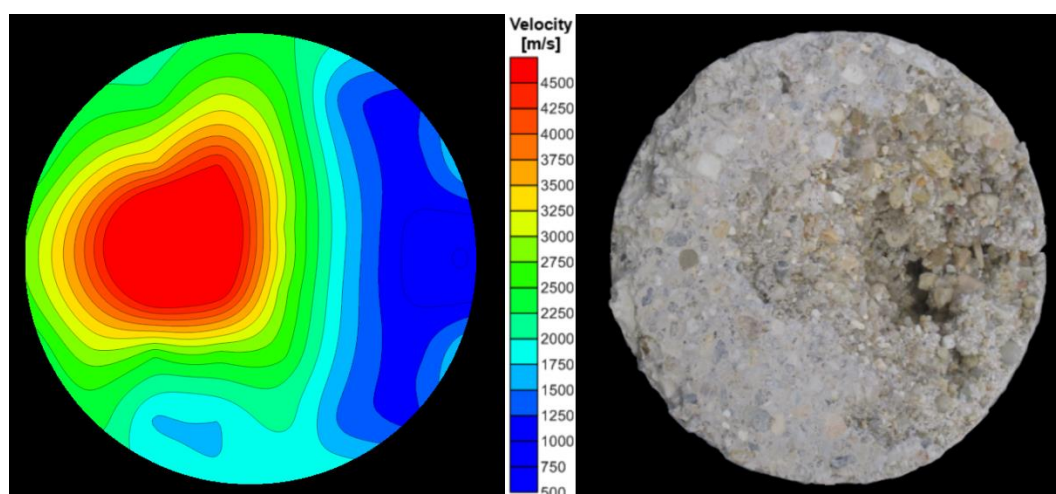


Figura 5.32 – $G_{0\%};1bar;60min;40^{\circ}C$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra

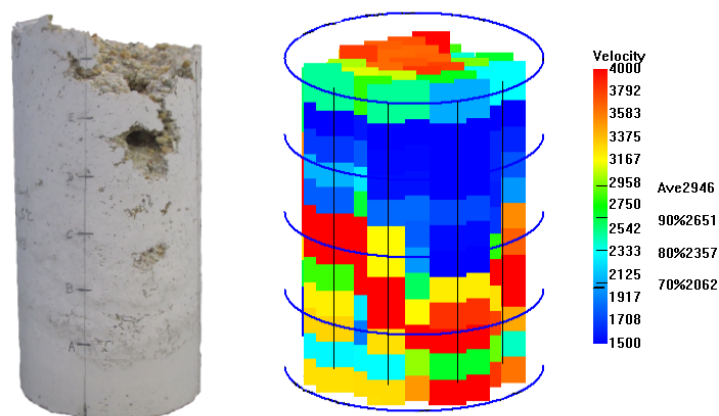


Figura 5.33 – G₀%SF;1bar;60min;40°C: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) da amostra

As restantes imagens das fatias da base e meio com os tomogramas 2D e respectiva fotografia encontram-se nas figuras A.15 e A.16 para os provetes com temperatura de injeção de 20°C, e figuras A.17 e A.18 para 40°C.

De notar que a tomografia ultra-sónica permite analisar de forma mais precisa o estado interior das amostras em estudo. Embora os tomogramas estejam em consonância com os resultados anteriormente obtidos no ensaio ultra-sónico e nos ensaios mecânicos, estes ensaios apresentam valores médios para uma dada distância ou fatia. Os tomogramas ultra-sónicos ilustram verdadeiramente a realidade do estado interior das amostras, quer pelas imagens em 2D, como em 3D. E, como se tem visto por comparação com as fotografias correspondentes, provam ser bastante precisos e úteis, principalmente, na detecção de vazios em que o *grout* injectado não penetrou.

5.3.2. Grout 2,5%SF, Grout 5%SF e Grout 10%SF

Como referido anteriormente, nos provetes referentes aos *grouts* de 2,5%, 5% e 10% de sílica de fumo, obteve-se apenas um sucesso de injeção parcial. Assim, não foi possível obter amostras nas condições adequadas para a criação de tomogramas, visto que é necessário que se conheça toda a estrutura interior do provete. Dada a fraca injeção verificada nestes provetes com alturas máximas de cerca de 14cm, não existem dados de medições ultra-sónicas suficientes na malha descrita em 5.2.1.

5.3.3. Comparação com meio poroso 40G/40M/20F

Por fim, comparam-se na figura 5.34, com as mesmas condições de injeção (pressão de 1 bar e temperatura de 20°C) e as mesmas características do *grout* (0% de sílica de fumo e 0 minutos de

tempo de repouso) os tomogramas ultra-sónicos de diferentes meios porosos.

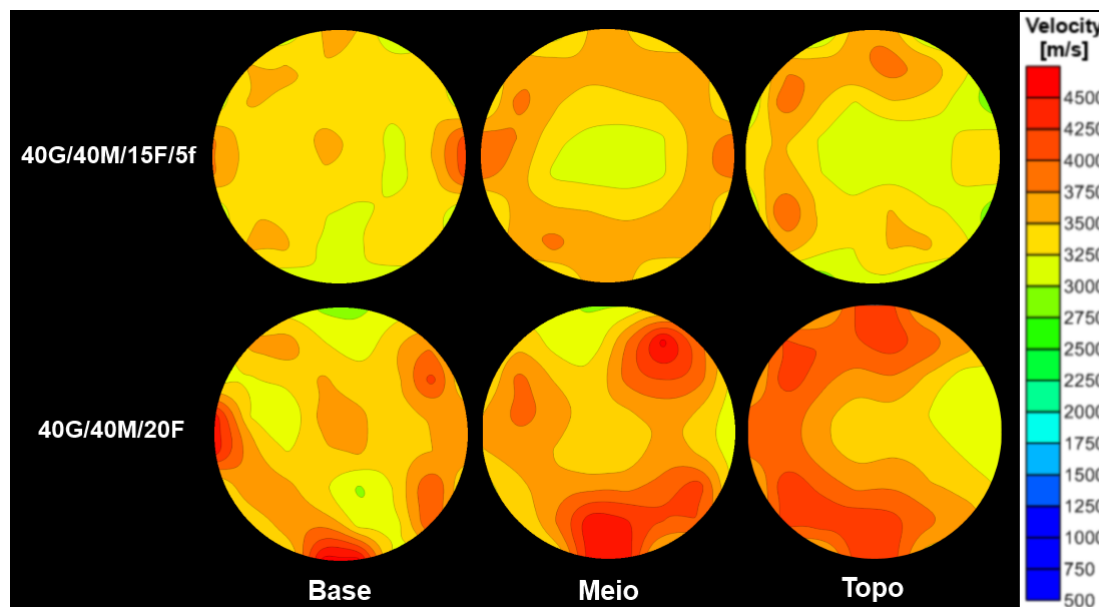


Figura 5.34 – G₀%SF;1bar;0min;20°C: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas em amostras com diferentes meios porosos

Comparando os tomogramas ultra-sónicos das diferentes granulometrias, obtêm-se, tal como visto em 4.3.3 e 4.4.4, melhores resultados para 40G/40M/20F, o meio poroso que não apresenta a fracção granulométrica mais fina de areia. Apesar do limite inferior ser o mesmo para ambas as amostras, isto é, não existirem velocidades de ultra-sons inferiores a 2750 m/s, parecem conseguir-se alcançar zonas com maior compacidade, ou seja, maiores velocidades ultra-sónicas na amostra de 40G/40M/20F. As velocidades ultra-sónicas no meio poroso sem a presença das menores partículas finas ultrapassam os 4000 m/s, representadas nos tomogramas pelas cores laranja-escuro e vermelho.

De notar ainda que, no caso do meio poroso 40G/40M/20F, o tomograma com melhores resultados parece ser o da fatia do topo, ao contrário do meio poroso 40G/40M/15F/5f que apresenta um tomograma da fatia do meio com mais altas velocidades ultra-sónicas. Tal pode ser explicado pelo facto do *grout* que chega ao topo ter uma relação água/ligante mais baixa, uma vez que vai perdendo água que é absorvida pelas partículas do meio poroso. Como tal, é um *grout* com menor parcela líquida, o que permite estabelecer melhores ligações com as partículas. O meio poroso com a presença das menores partículas finas apresenta vazios de menores dimensões, como tal, quanto mais afastado do ponto inicial de injeção, mais difícil é a penetrabilidade do *grout* nesses vazios, já que o *grout* encontra mais resistência ao escoamento.

As imagens com a comparação entre tomograma ultra-sónico e respectiva fotografia encontram-se em anexo nas figuras A.19 (fatia da base), A.20 (fatia do meio) e A.21 (fatia do topo).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Finalizados os diferentes estudos realizados ao longo do presente trabalho, foi possível retirar conclusões sobre os resultados obtidos.

A avaliação da utilização do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons é positiva, quer na análise realizada no provete inteiro (vd. 4.3), quer na análise das fatias (vd. 4.4), visto estarem de acordo com os resultados obtidos através do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral. Esta consonância entre resultados é obtida apesar de ambos os ensaios analisarem o objecto de estudo de formas ligeiramente diferentes. O ensaio de ultra-sons depende da compacidade do material e da continuidade na zona de interface (a velocidade de propagação é tanto maior quanto mais denso for o material), enquanto que o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral depende não só da compacidade mas também das ligações mecânicas e químicas que se estabelecem entre o *grout* e o meio poroso. No entanto, quando não complementada pela técnica de tomografia ultra-sónica, o ensaio ultra-sónico constitui uma solução limitada no sentido de avaliar a técnica de injeção de *grout* em alvenarias antigas.

A tomografia ultra-sónica (vd. 5) permitiu analisar de forma mais precisa o estado interior das amostras em estudo. Embora os tomogramas estejam em consonância com os resultados obtidos no ensaio ultra-sónico e nos ensaios mecânicos, estes ensaios apresentam valores médios para uma dada distância ou fatia. Os tomogramas ultra-sónicos ilustram verdadeiramente a realidade do estado interior das amostras, quer pelas imagens em 2D, como em 3D. E, como se pode confirmar por comparação com as fotografias correspondentes, provam ser bastante precisos e úteis, principalmente na detecção de vazios em que o *grout* injectado não penetrou. Tal sugere que a utilização de tomografia sónica como método de avaliação não destrutivo da qualidade de injeções de *grout* em alvenarias, com constituição semelhante à estudada no presente trabalho, constitui uma ferramenta bastante valiosa e fiável.

À semelhança dos resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral e do ensaio de ultra-sons em que foi visível a dependência pela capacidade da injeção de *grout*, nos valores do ensaio de corte (vd. 4.5) também foi notória esta dependência dada a importância da injectabilidade para uma maximização do imbricamento entre as partículas.

Quanto à avaliação do efeito das diferentes condições de injeção na eficiência das injeções de *grouts*, tanto o ensaio de ultra-sons, como os ensaios mecânicos, como a técnica de tomografia ultra-sónica, parecem apontar inequivocamente para as mesmas conclusões.

Verificou-se que a temperatura de injeção à qual se obtêm melhores resultados depende do tempo de repouso do *grout*. Para um *grout* sem tempo de repouso, independentemente da pressão de injeção, os melhores resultados obtiveram-se para a temperatura de 20°C, seguidos pela injeção a 5°C, e por último a 40°C. A explicação para se terem verificado piores resultados nas injeções à temperatura de 40°C deve-se ao facto de, a esta temperatura, se originar um pior comportamento reológico do *grout*, isto é, maior viscosidade plástica e maior tensão de cedência. A mais alta temperatura de injeção pode ainda ter causado uma maior evaporação de água do *grout* durante a injeção. À medida que a água se evapora do *grout*, a fricção interna e a colisão entre partículas sólidas aumenta, dando origem a uma maior tensão de cedência e, consequentemente obtém-se uma menor penetrabilidade no meio poroso. A menor penetrabilidade proporcionou uma menor compacidade das amostras, que se reflectiu nos ensaios realizados. Note-se ainda que, à temperatura de 40°C dá-se uma hidratação rápida no estado inicial que origina uma distribuição mais heterogénea dos produtos de hidratação, sendo que os produtos hidratados precipitam à volta das partículas de ligante, dando origem a uma densa camada em seu redor. A baixas temperaturas, a hidratação começa lentamente, o que permite aos iões dissolvidos mais tempo para se difundirem antes dos produtos hidratados se precipitarem, dando origem à constituição dos silicatos hidratados em menor densidade, a uma distribuição mais homogénea dos produtos e a uma porosidade menos grosseira.

No entanto, a temperaturas mais baixas, como a 5°C, a temperatura do *grout* começa a aproximar-se do ponto de congelação da água, o que leva à formação de fortes ligações de hidrogénio. Por sua vez, ao nível molecular, a temperatura está relacionada com os movimentos aleatórios das partículas (movimento Browniano). Isto significa que para temperaturas mais baixas a agitação molecular diminui (partículas de *grout* estão mais próximas umas das outras), assim um menor estado de liberdade provoca uma maior floculação. Além disso, é também possível que a temperaturas mais baixas possa ocorrer uma diminuição na intensidade do mecanismo de dispersão das moléculas de superplastificante, causada por alterações no arranjo espacial do superplastificante adsorvido.

Ainda relativamente ao efeito da temperatura no momento da injeção de *grout*, neste caso para o *grout* com tempo de repouso de 60 minutos, os melhores resultados foram desta feita obtidos para a temperatura de 5°C, sendo os piores novamente para 40°C. Para além dos parâmetros reológicos, existe o fenómeno da floculação, que varia em função do tempo e da temperatura de repouso. Tendo em conta que maior floculação significa forças de atracção mais fortes entre as partículas de ligante (combinação de interacções de Van-der-Waals e forças de atracção electrostáticas), a dispersão não é tão facilmente alcançada. Assim, uma vez que para maiores temperaturas existe maior floculação do *grout*, isto é, há mais tendência para as partículas sólidas de *grout* se agruparem ao longo do tempo dado que o *grout* está em repouso, origina que o *grout* tenha menor capacidade de injectabilidade. Esta menor injectabilidade significa que as amostras apresentam menor compacidade, que se traduz em piores resultados registados nos ensaios, e em vazios representados nos tomogramas ultra-sónicos pela cor azul, para os provetes injectados a 20°C (figuras

5.30 e 5.31) e, especialmente, a 40°C (figuras 5.32 e 5.33).

Quanto ao efeito da pressão de injeção verificou-se não existirem diferenças relevantes quer entre 1 bar e 0,5 bar (no caso dos provetes com *Grout* 0%SF), quer entre 1 bar e 2 bar (no caso dos provetes com *Grout* 10%SF). Tendo em conta que os resultados obtidos foram semelhantes, e que nas restantes condições estudadas existem maiores consequências na injectabilidade, pode considerar-se que o valor da pressão de injeção acaba por ser pouco significativo. De notar apenas que, apesar dos resultados dos provetes injectados à pressão de 1 bar terem sido ligeiramente melhores, nas injeções com menor pressão pareceu conseguir-se uma injeção mais estável e obter-se menores variações entre as fatias, isto é, uma injeção mais homogênea em função da altura do provete.

No que diz respeito ao tempo de repouso do *grout* verificaram-se melhores resultados nos *grouts* injectados sem tempo de repouso comparativamente aos *grouts* injectados com 60 minutos de tempo de repouso. Com um tempo de repouso de 60 minutos, os *grouts* encontram-se num estado de floculação avançado, no qual se estabelecem ligações permanentes (e irreversíveis) entre as partículas, isto é, mesmo que se volte a aplicar uma taxa de corte à mistura, estas já não se separam. Este impedimento em voltar ao estado inicial reduz a injectabilidade do *grout*. Assim sendo, as zonas mais afastadas do ponto de injeção terão menos *grout*, dando origem a pequenas zonas não injectáveis, que se traduzem em piores resultados registados nos ensaios. No entanto, as diferenças entre o tempo de repouso de 0 e 60 minutos são mais evidentes para maiores temperaturas (20°C e 40°C) do que para 5°C, visto que o aumento de temperatura conduz a reacções de hidratação mais rápidas e a um maior estado de floculação. Além disso, o crescimento dos produtos de hidratação na superfície das partículas do ligante vai cobrir as camadas adsorvidas de superplastificante, o que resulta numa perda progressiva de acção de dispersão do superplastificante. Para a temperatura de injeção de 5°C, os resultados acabam por se aproximar, devido à existência de uma maior percentagem de água livre, o que permite que as reacções de hidratação se dêem por mais tempo

No que se refere aos provetes injectados com *grouts* de 2,5%, 5% e 10% de sílica de fumo, obteve-se apenas um sucesso de injeção parcial, sendo que foi apenas possível obter resultados de análise da fatia única através do ensaio ultra-sónico da fatia e do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral. Após retirar-se a cofragem do provete e o meio poroso solto, isto é, as partículas de areia às quais não foi possível fazer chegar o *grout*, pôde-se analisar visualmente essa área em que ocorreu o bloqueio. Como se pode observar no exemplo apresentado na figura 4.24, parece existir um excesso de partículas de *grout* na superfície da amostra. A explicação para tal é a ocorrência de um efeito tampão por parte das partículas de *grout*. Acontece neste caso que as partículas de sílica de fumo como são muito pequenas (cerca de 100x menores que as partículas de HL5) têm tendência para flocularem em aglomerados maiores que originam esta acção de bloqueio. Este fenómeno denomina-se de filtração do *grout* e ocorre quando um aglomerado de partículas de *grout* se acumula na entrada ou no interior de um vazio ou fissura, impedindo o fluxo do *grout* e a penetração adicional. A filtração do *grout* não ocorreu unicamente nos casos de *grout* com sílica de

fumo. Como se pode observar na figura 5.18, este fenómeno ocorreu igualmente para o *grout* com tempo de repouso de 60 minutos, visto que o maior estado de floculação que o *grout* apresenta a 60min torna-o mais denso, e consequentemente mais propício à ocorrência do fenómeno mencionado.

Comparando os diferentes *grouts* usados nas injeções dos provetes (vd. 4.4.3) concluiu-se que, apesar de a injeção não ter sido bem sucedida em altura, os melhores resultados surgiram para o provete de *grout* com 2,5% de sílica de fumo. Os piores resultados registaram-se para as amostras injectadas com *grouts* de 5% e 10% de sílica de fumo, pelo que se concluiu que apesar da sílica de fumo ter características que favorecem as ligações do *grout* com o meio poroso, necessita ser usada em pequenas quantidades para não comprometer a fluidez do *grout*. A sílica de fumo diminui a porosidade e permeabilidade do *grout*, e aumenta a sua resistência mecânica. A redução do volume total de poros no *grout* com sílica de fumo é causada pela alta reactividade pozolânica e o efeito de enchimento de poros causado pelas pequenas partículas de sílica de fumo. As pequenas partículas de sílica de fumo podem ter preenchido de forma eficiente entre os grãos de cal hidráulica, e assim subdividindo o espaço dos poros, criando uma estrutura de poros muito mais densa. Portanto, pode ser referido que a sílica de fumo actua tanto fisicamente, como material de enchimento, como quimicamente, reagindo com Ca(OH)_2 para formar Silicato de cálcio hidratado (C-S-H), para auxiliar na melhoria da resistência. Desta forma, o benefício da adição de sílica de fumo foi duplo: reduziu o volume total de poros e aumentou a resistência mecânica.

Outro factor que, possivelmente, contribuiu para o registo de maiores velocidades ultrasónicas e resistências à tracção por compressão diametral nas amostras de *Grout* 2,5%SF, foi o menor volume de vazios resultante da retracção do *grout*. A diferença no fenómeno de retracção, comparativamente ao *grout* sem sílica de fumo, deve-se fundamentalmente à retracção por dessecação do *grout*. A maior absorção de água por parte das partículas de sílica de fumo, devido à maior quantidade de produtos de hidratação, significa menos água livre no interior da amostra durante o processo de cura, pelo que existe menos evaporação, e consequentemente menor retracção. A menor retracção por dessecação do *grout* traduz-se em menos vazios no interior da amostra, conferindo condições para os melhores resultados por parte do *grout* com 2,5% de sílica de fumo.

Na comparação entre meios porosos com diferentes granulometrias obteve-se melhores resultados para 40G/40M/20F, o meio poroso que não apresenta a fracção granulométrica mais fina de areia, do que para 40G/40M/15F/5f. Ainda assim, as diferenças de resultados entre ambos os meios porosos foram pequenas. A excepção foi a fatia do topo que apresentou claramente melhores resultados para o meio poroso 40G/40M/20F, o que pode ser explicado pelo facto de o *grout* que chega ao topo ter uma relação água/ligante mais alta, uma vez que vai perdendo água que é absorvida pelas partículas do meio poroso, e como tal é um *grout* com menor parcela líquida, o que permite estabelecer melhores ligações com as partículas. O meio poroso com a presença das menores partículas finas apresenta vazios de menores dimensões, como tal, quanto mais afastado do ponto inicial de injeção, mais difícil é a penetrabilidade do *grout* nesses vazios, já que o *grout* encontra

mais resistência ao escoamento.

Estes resultados não devem ser generalizados, visto que a influência dos parâmetros analisados poderá depender de outros factores não considerados neste estudo, como a relação água/ligante, tipo de superplastificante, composição mineralógica da cal hidráulica, entre outros. No entanto, esta investigação demonstrou a influência da dosagem de sílica de fumo, assim como a importância de temperatura adequada, tempo de repouso e pressão de injeção na melhoria da injectabilidade de *grouts* de cal hidráulica.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Além de ter possibilitado a obtenção de diversas conclusões, o presente trabalho pode também servir de lançamento para futuros estudos nesta área de avaliação ultra-sónica de injeção de *grouts*.

Relativamente ao meio poroso estudado no presente trabalho (areia), este é um material presente no núcleo ou pano interior de alvenarias antigas que podem ser alvo de aplicação da técnica de injeção de *grouts*. No entanto, quaisquer outros materiais que sejam identificados na constituição de alvenarias antigas podem constituir uma variante ao presente trabalho, a fim de aferir igualmente as suas características e o modo como estas podem influenciar a eficiência da injeção de *grouts* nesses tipos de alvenarias.

No presente trabalho analisou-se o efeito da temperatura no momento em que se realiza a injeção de *grout*. Seria igualmente oportuno avaliar a influência da temperatura ao longo do tempo do processo de cura do *grout*.

Igualmente passível de desenvolvimentos futuros poderá ser o uso de diferentes constituições do *grout*, com variações nas percentagens de superplastificante e sílica de fumo relativamente às aplicadas neste estudo, ou mesmo a introdução de outras adições para além da sílica de fumo.

Quanto aos modelos utilizados para simular alvenarias antigas, os resultados obtidos neste trabalho poderão fornecer informações adicionais que permitam melhorar a aplicação da técnica de injeção de provetes, de modo a aproximar das reais condições de injeção *in-situ*.

Ao nível das malhas de pontos utilizadas nos ensaios de ultra-sons, poderão ser estudadas diferentes configurações com vista ao aperfeiçoamento do ensaio, quer às circunstâncias de injeção e avaliação da injeção *in-situ*, quer ao *software* de tomografia ultra-sónica utilizado.

Igualmente passível de desenvolvimentos futuros poderá ser a metodologia seguida na avaliação da injeção de *grouts* com recurso a tomografia ultra-sónica. Além das possíveis alterações relativamente às malhas, poderão ser estudados diferentes *softwares* de processamento de dados, bem como diferentes processos iterativos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. C496/496M-04, United States, ASTM, 2002.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. C 597-02, United States, ASTM, 2004.
- [3] ANDREUCCI, R. - *Ensaio por ultrassom*. Associação Brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção, 2011.
- [4] ANZANI, A.; BINDA, L.; LUALDI, M.; TEDESCHI, C.; ZANZI, L. - *Use of Sonic and GPR Tests to Control the Effectiveness of Grout Injections of Stone Masonry*. ECNDT 2006, Volume 3, págs. 1–7, 2006.
- [5] ARTELT, C.; GARCIA, E. - *Impact of superplasticizer concentration and of ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions*. Cement and Concrete Research, Volume 38, págs. 633–642, 2008.
- [6] ASSAAD, J.; DAOU, Y. - *Cementitious grouts with adapted rheological properties for injection by vacuum techniques*. Cement and Concrete Research, Volume 59, págs. 43–54, 2014.
- [7] BALTAZAR, L.; HENRIQUES, F.; JORNE, F. - *Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments*. Construction and Building Materials, Volume 35, págs. 838–845, 2012.
- [8] BALTAZAR, L.; HENRIQUES, F.; JORNE, F. - *Hydraulic lime grouts for masonry injection—effects of admixtures on the fresh grout properties*. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw, Poland, 15th-17th October, 2012.
- [9] BALTAZAR, L.; HENRIQUES, F.; JORNE, F.; CIDADE, M. - *Contribution to the design of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation*. Journal of Civil Engineering and Management, 2012.
- [10] BALTAZAR, L.; HENRIQUES, F.; JORNE, F.; CIDADE, M. - *Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study*. 13th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, New Forest, UK, 25th-27th June, 2013.
- [11] BALTAZAR, L.; HENRIQUES, F.; JORNE, F.; CIDADE, M. - *The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls*. Rheologica Acta, Volume 52, págs. 127–138, 2013.
- [12] BALTAZAR, L.; HENRIQUES, F.; JORNE, F.; CIDADE, M. - *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*. Construction and Building Materials, Volume 50, págs. 584–597, 2014.
- [13] BINDA, L.; BARONIO, G.; TIRABOSCHI, C.; TEDESCHI, C. - *Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto*. Construction and Building Materials, Volume 17, págs. 629–639, 2003.

- [14] BINDA, L.; LUALDI, M.; SAISI, A. - *Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*. International Journal of Architectural Heritage, Volume 1, págs. 380–402, 2007.
- [15] BINDA, L.; MODENA, C.; BARONIO, G.; ABBANEO, S. - *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 133–142, 1997.
- [16] BINDA, L.; SAISI, A. - *State of the Art of Research on Historic Structures in Italy*. Dept. of Structural Engineering - Politecnico of Milan, Italy, 2001.
- [17] BINDA, L.; SAISI, A.; TIRABOSCHI, C. - *Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures*. NDT & E International, Volume 34, págs. 123–138, 2001.
- [18] BINDA, L.; SAISI, A.; ZANZI, L. - *Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy)*. NDT & E International, Volume 36, págs. 215–227, 2003.
- [19] BRAS, A. - *Grout optimization for masonry consolidation*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [20] BRAS, A.; HENRIQUES, F. - *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, Volume 26, págs. 135–144, 2012.
- [21] BRAS, A.; HENRIQUES, F.; CIDADE, M. - *Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour*. Construction and Building Materials, Volume 24, págs. 1511–1517, 2010.
- [22] BRAS, A.; HENRIQUES, F.; CIDADE, M. - *Rheological behaviour of hydraulic lime-based grouts. Shear-time and temperature dependence*. Mechanics of Time-Dependent Materials, Volume 17, págs. 223–242, 2012.
- [23] BUYUKOZTURK, O. - *Imaging of concrete structures*. Ndt & E International, Volume 31, págs. 233–243, 1998.
- [24] CANTINI, L.; FELICETTI, R.; ZANZI, L.; MUNDA, S.; MEANA, M.; BINDA, L. - *Sonic tomography applied to historic masonry structures: validation of the testing methodology and of the data elaboration by different computer codes*. Proc14th international conference – structural faults & repair, Scotland, 3rd–5th July, 2012.
- [25] COELHO, J. - *Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [26] COLLEPARDI, M. - *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. Materials and Structures, Volume 23, págs. 81–102, 1990.
- [27] CONCU, G.; DE NICOLO, B.; PIGA, C.; POPESCU, V. - *Measurement system for non-destructive testing using ultrasonic tomography spectral attenuation*. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20th–22th May. págs. 1016–1020, 2010.

- [28] CONCU, G.; DE NICOLO, B.; PIGA, C.; POPESCU, V. - *Non-Destructive Testing of Stone Masonry using Acoustic Attenuation Tomography Imaging*. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20th–22th May, 2010.
- [29] CORRADI, M.; TEDESCHI, C.; BINDA, L.; BORRI, A. - *Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing*. Construction and Building Materials, Volume 22, págs. 463–472, 2008.
- [30] EKLUND, D.; STILLE, H. - *Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, págs. 389–398, 2008.
- [31] FCT-UNL - *Ficha de ensaio FE 13 - Pedras naturais e artificiais. Velocidade de propagação do som*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1996.
- [32] FERNÁNDEZ-ALTABLE, V.; CASANOVA, I. - *Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures*. Cement and Concrete Research, Volume 36, págs. 1222–1230, 2006.
- [33] HUNTER, R. - *Foundations of colloid science*. 2nd ed. New York: Oxford University Press Inc, 2001.
- [34] IGNOUL, S.; VAN RICKSTAL, F.; VAN GEMERT, D. - *Application of mineral grouts. Case study and impact on structural behaviour: Church of St. Catharina at Duisburg (B)*. Structural Analysis of Historical Constructions, A.A. Balkema Publishers, Leiden, 2005.
- [35] IPQ. NP EN 934-2 - *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem*. Instituto Português da Qualidade, Monte da Caparica, 2009.
- [36] JORNE, F. - *Comunicação particular*. Departamento Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [37] JORNE, F.; HENRIQUES, F. - *Study of hydraulic lime grout injections in different porous media: an experimental study*. 13th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, New Forest, UK, 25th-27th June, 2013.
- [38] JORNE, F.; HENRIQUES, F.; BALTAZAR, L. - *Avaliação da técnica de injeção de grout recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica*. Congresso Construção 2012, Coimbra, 18-20 de Dezembro, 2012.
- [39] JORNE, F.; HENRIQUES, F.; BALTAZAR, L. - *Grout injection in porous media with different internal structures*. 14th International Conference - Structural Faults & Repair, Edimburgh, 3rd-5th July, 2012.
- [40] JORNE, F.; HENRIQUES, F.; BALTAZAR, L. - *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures, 2014.
- [41] JORNE, F.; HENRIQUES, F.; BALTAZAR, L. - *Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography*. Construction and Building Materials, Volume 66, págs. 494–506, 2014.
- [42] KADRI, E.-H.; AGGOUN, S.; DE SCHUTTER, G. - *Interaction between C3A, silica fume and naphthalene sulphonate superplasticiser in high performance concrete*. Construction and Building Materials, Volume 23, págs. 3124–3128, 2009.

- [43] KALAGRI, A.; MILTIADOU-FEZANS, A.; VINTZILEOU, E. - *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*. Materials and Structures, Volume 43, págs. 1135–1146, 2010.
- [44] KESTIN, J.; SOKOLOV, M.; WAKEHAM, W. - *Viscosity of liquid water in the range $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $150\text{ }^{\circ}\text{C}$* . Journal of Physical and Chemical Reference Data, Volume 7, págs. 941, 1978.
- [45] LASKAR, A.; TALUKDAR, S. - *Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending*. Construction and Building Materials, Volume 22, págs. 2345–2354, 2008.
- [46] LEI, W.-G.; STRUBLE, L. - *Microstructure and Flow Behavior of Fresh Cement Paste*. Journal of the American Ceramic Society, Volume 80, págs. 2021–2028, 2005.
- [47] LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; ALDER, C.; WIELAND, E.; LUNK, P. - *Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes*. Cement and Concrete Research, Volume 37, págs. 483–491, 2007.
- [48] MAHAUT, F.; MOKÉDDEM, S.; CHATEAU, X.; ROUSSEL, N.; OVARLEZ, G. - *Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials*. Cement and Concrete Research, Volume 38, págs. 1276–1285, 2008.
- [49] MARTINS, R.; BOMBARD, A. - *Rheology of fresh cement paste with superplasticizer and nanosilica admixtures studied by response surface methodology*. Materials and Structures, Volume 45, págs. 905–921, 2011.
- [50] MATOS, J. - *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [51] PORTO, F.; VALLUZZI, M.; MODENA, C. - *Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings*. International Symposium - Non Destructive Testing in civil engineering, Germany, 2003.
- [52] RIBEIRO, J. - *Aplicação de ultrassons na caracterização de estruturas de betão*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [53] RODRÍGUEZ-MAYORGA, E.; YANES, E.; SÁEZ, A. - *The restoration of the Parish Church of San Dionisio in Jerez de la Frontera (Spain)*. Structural Analysis of Historical Constructions, Poland, 2012.
- [54] ROUSSEL, N.; CUSSIGH, F. - *Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy*. Cement and Concrete Research, Volume 38, págs. 624–632, 2008.
- [55] SCHULLER, M.; BERRA, M.; ATKINSON, R.; BINDA, L. - *Acoustic Tomography for evaluation of unreinforced masonry*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 199–204, 1997.
- [56] SHANNAG, M. - *High-performance cementitious grouts for structural repair*. Cement and Concrete Research, Volume 32, págs. 803–808, 2002.
- [57] SHIHADA, S.; ARAFA, M. - *Effects of silica fume, ultrafine and mixing sequences on properties of ultra high performance concrete*. Asian Journal of Materials Science, Volume 2, págs. 137–146, 2010.

- [58] TOUMBAKARI, E. - *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2002.
- [59] TOUMBAKARI, E.; VAN GEMERT, D.; TASSIOS, T.; VINTZILEOU, E. - *Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls*. Structural Analysis of Historical Constructions. Structural Analysis of Historical Constructions, London, págs. 707–718, 2005.
- [60] VALLUZZI, M. - *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2005.
- [61] VALLUZZI, M.; MAZZON, N.; MUNARI, M. - *Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions*. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2009.
- [62] VAN RICKSTAL, F. - *Grout injection of masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- [63] VAN RICKSTAL, F.; TOUMBAKARI, E.; IGNOUL, S.; VAN GEMERT, D. - *Development of mineral grouts for consolidation injection*. In Consolidation of Masonry, Ed. D. Van Gemert, Advances in Materials Science and Restoration. págs. 61–70, 2003.
- [64] VEIGA, M.; SOUZA, R. - *Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua moldagem*. Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho. págs. 45–56, 2004.
- [65] YAMADA, K.; TAKAHASHI, T.; HANEHARA, S.; MATSUHISA, M. - *Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer*. Cement and Concrete Research, Volume 30, págs. 197–207, 2000.
- [66] ZANZI, L.; SAISI, A.; BINDA, L.; CARDARELLI, E. - *Sonic tomography of the stone pillars of a 17th century church*. Transactions on the Built Environment, Volume 55, 2001.

ANEXOS

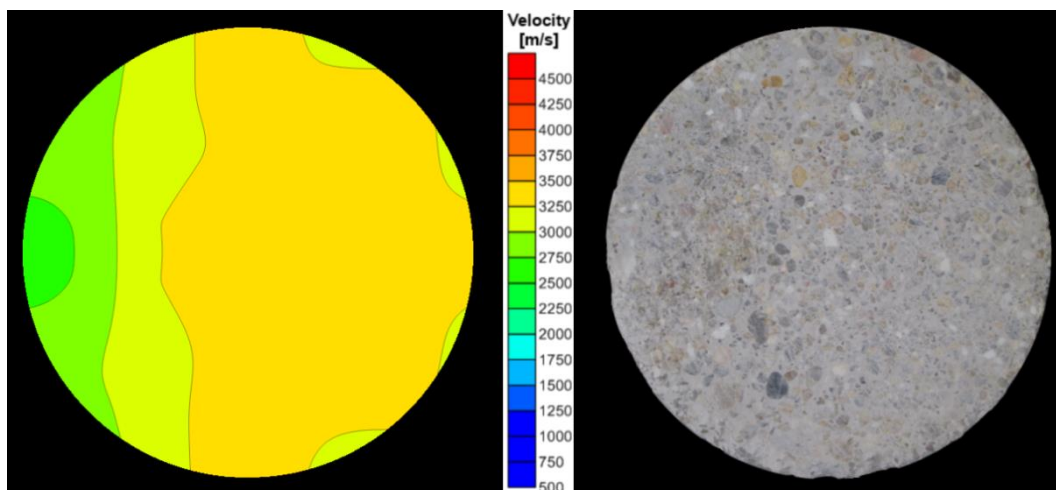


Figura A.1 – $G_0\%$;1bar;0min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

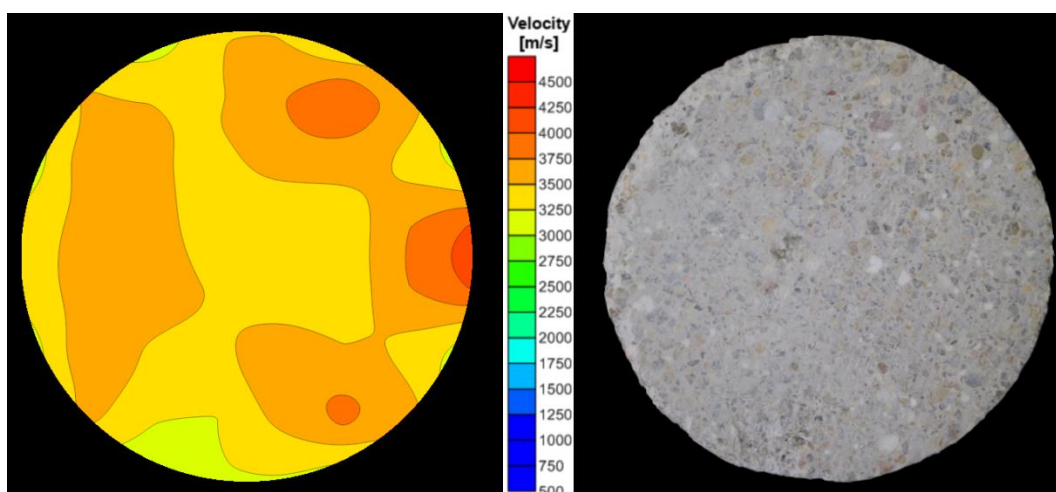


Figura A.2 – $G_0\%$;1bar;0min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

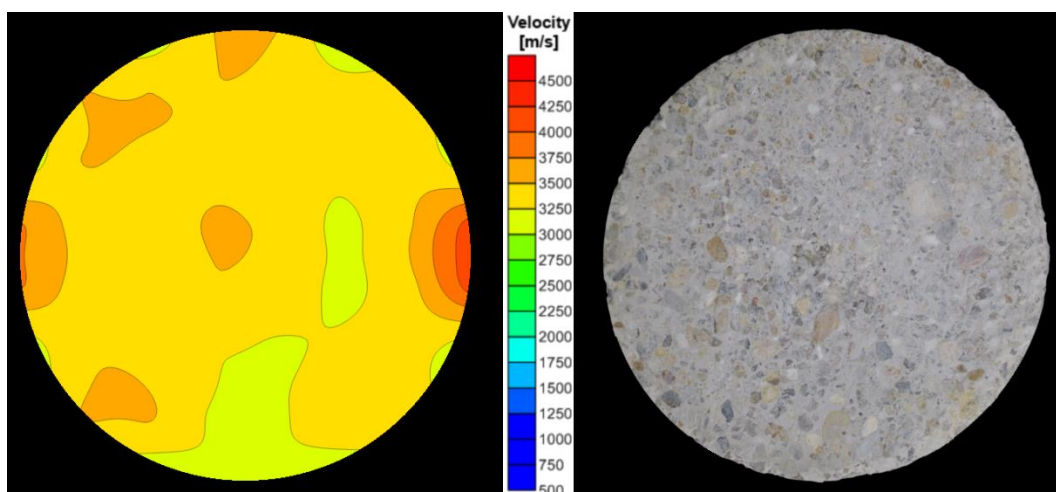


Figura A.3 – $G_0\%$;1bar;0min;20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

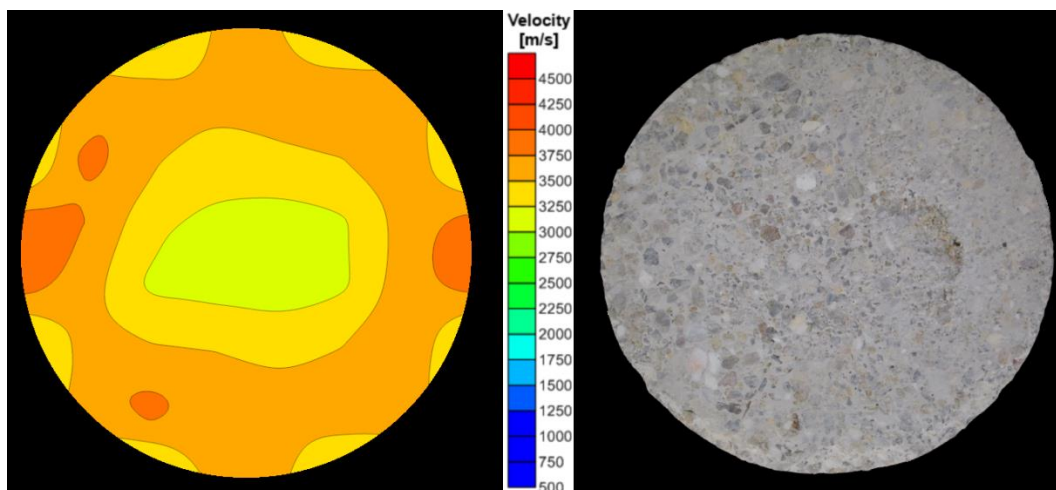


Figura A.4 – $G_0\%$; 1bar; 0min; 20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

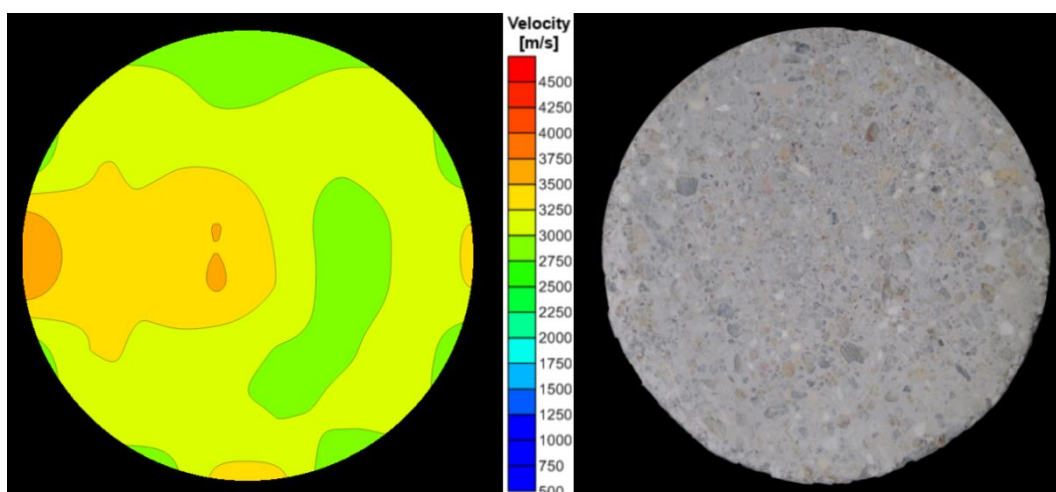


Figura A.5 – $G_0\%$; 1bar; 0min; 40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

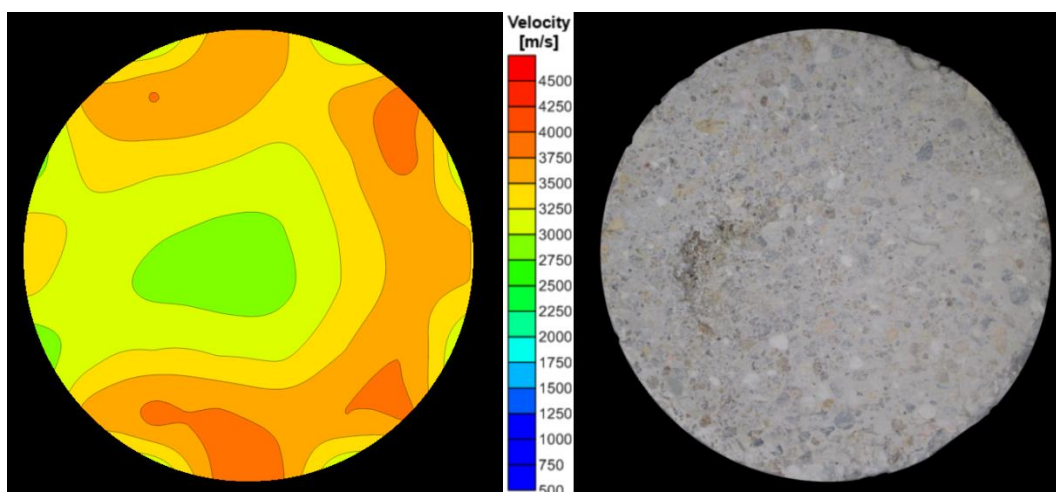


Figura A.6 – $G_0\%$; 1bar; 0min; 40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

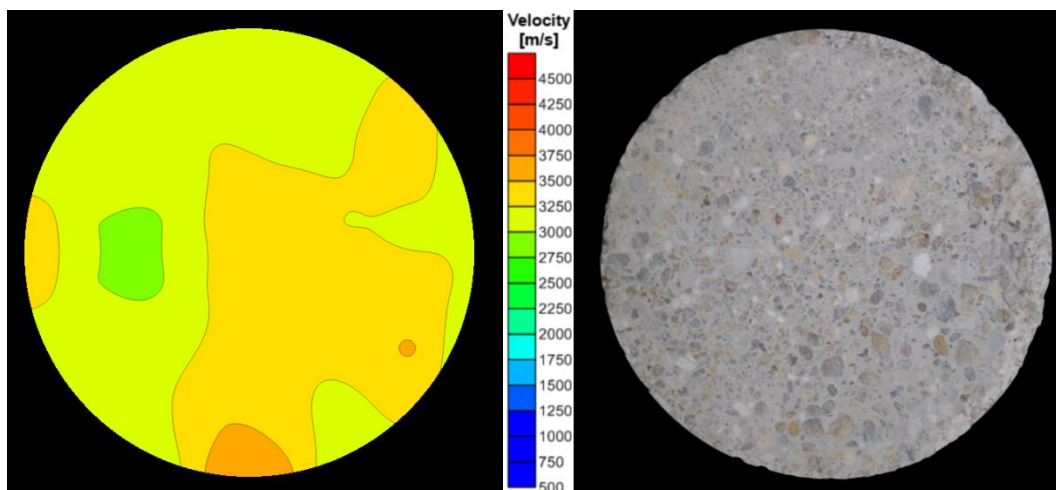


Figura A.7 – $G_0\%$;0,5bar;0min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

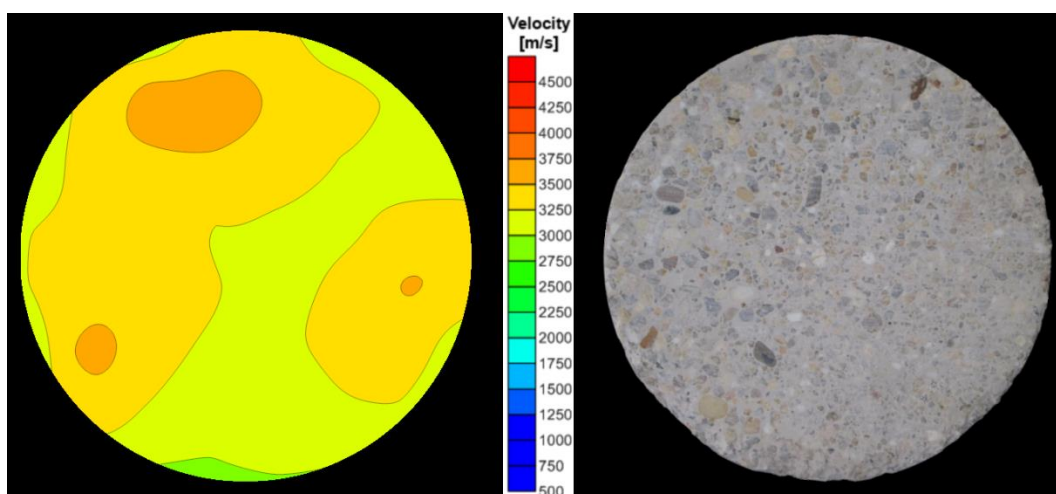


Figura A.8 – $G_0\%$;0,5bar;0min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

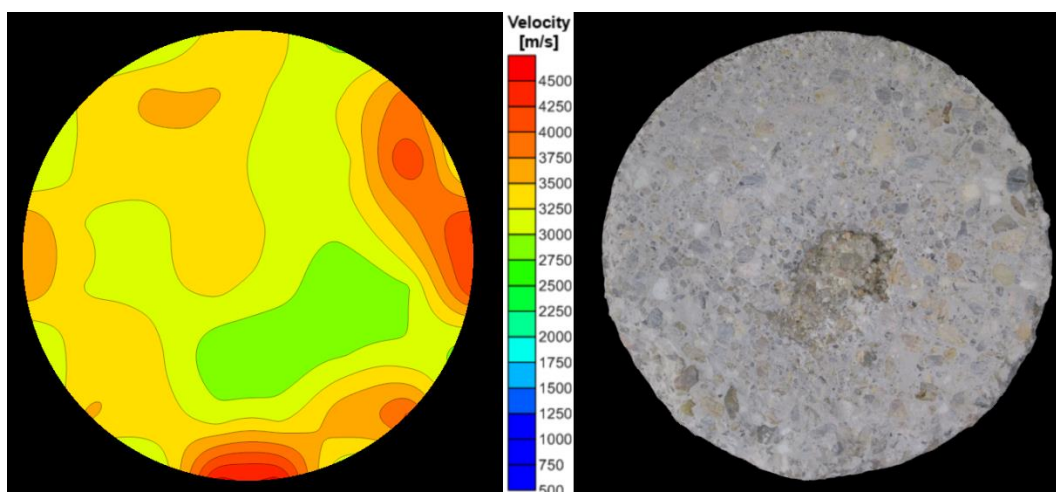


Figura A.9 – $G_0\%$;0,5bar;0min;20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

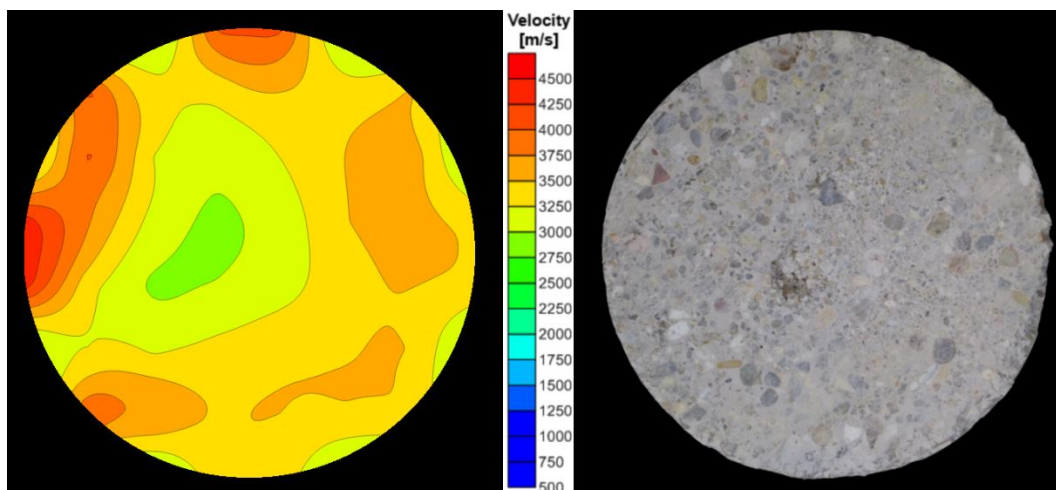


Figura A.10 – $G_0\%$;0,5bar;0min;20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

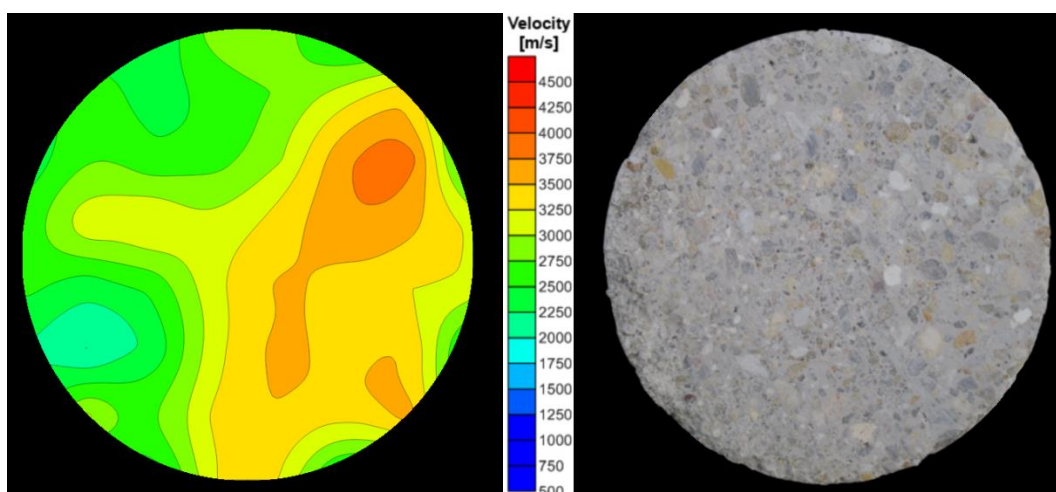


Figura A.11 – $G_0\%$;0,5bar;0min;40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

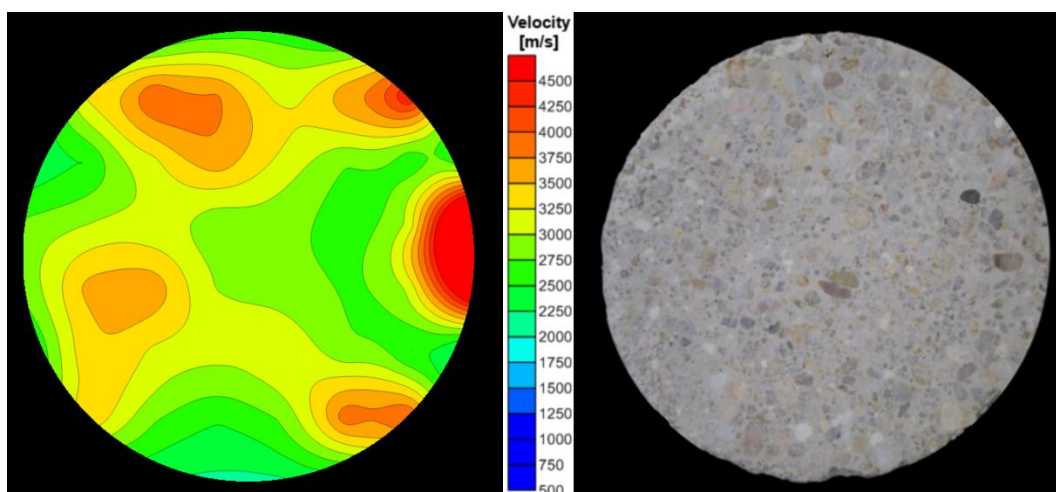


Figura A.12 – $G_0\%$;0,5bar;0min;40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

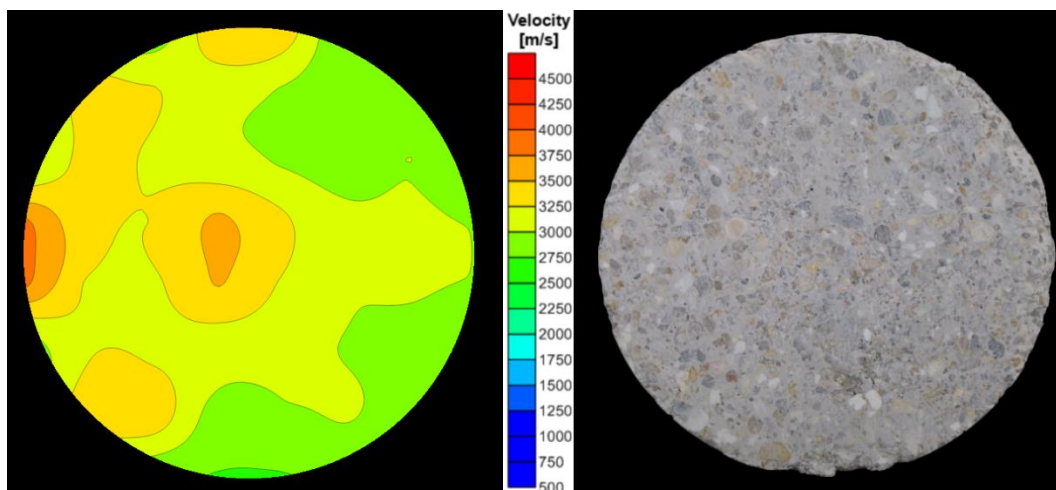


Figura A.13 – $G_0\%$;1bar;60min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

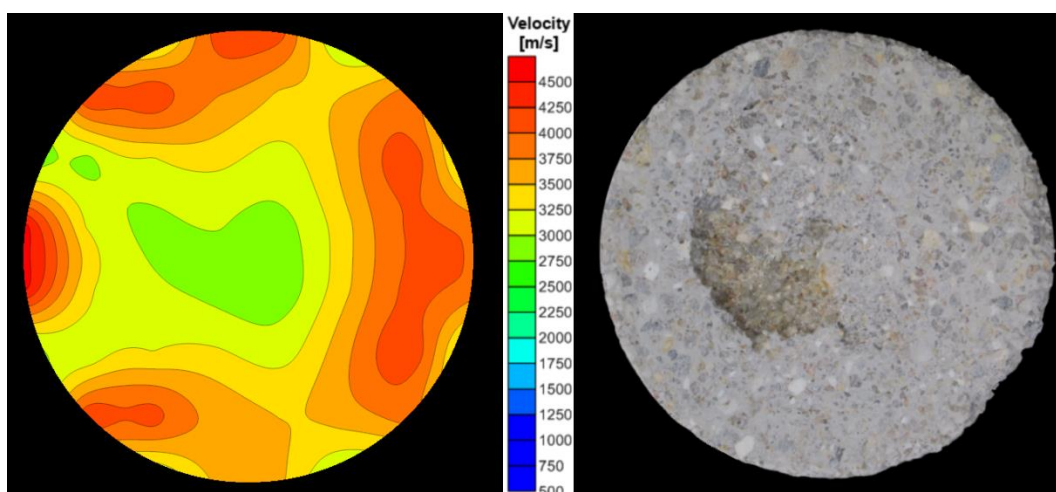


Figura A.14 – $G_0\%$;1bar;60min;5°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

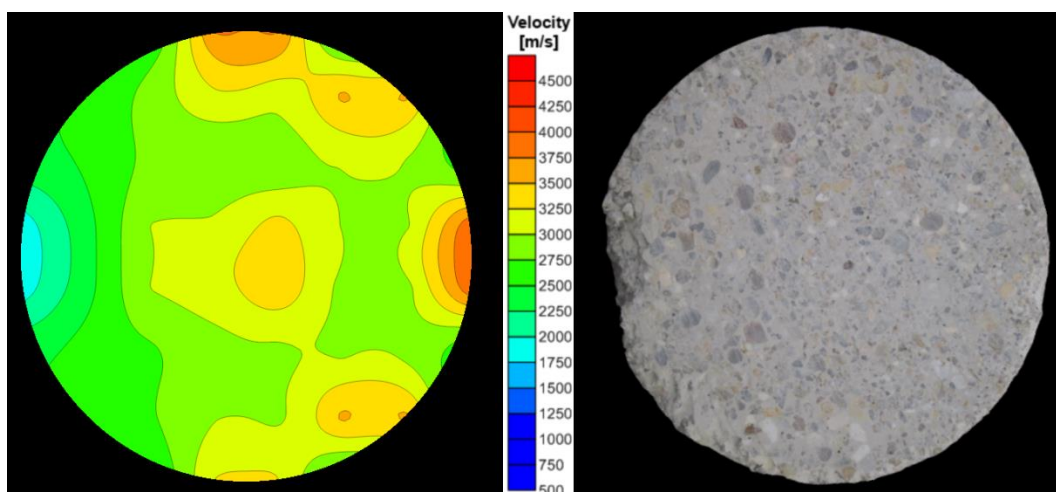


Figura A.15 – $G_0\%$;1bar;60min;20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

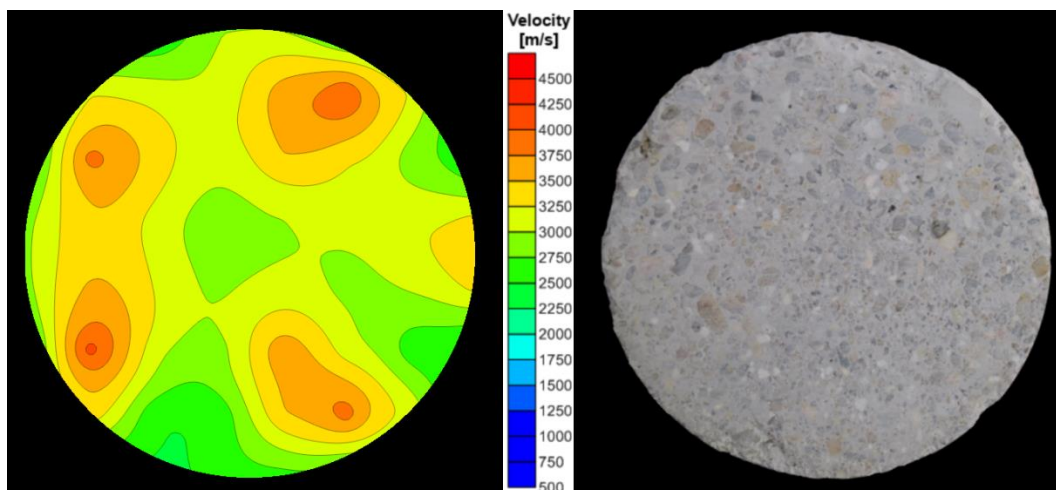


Figura A.16 – $G_0\%$;1bar;60min;20°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

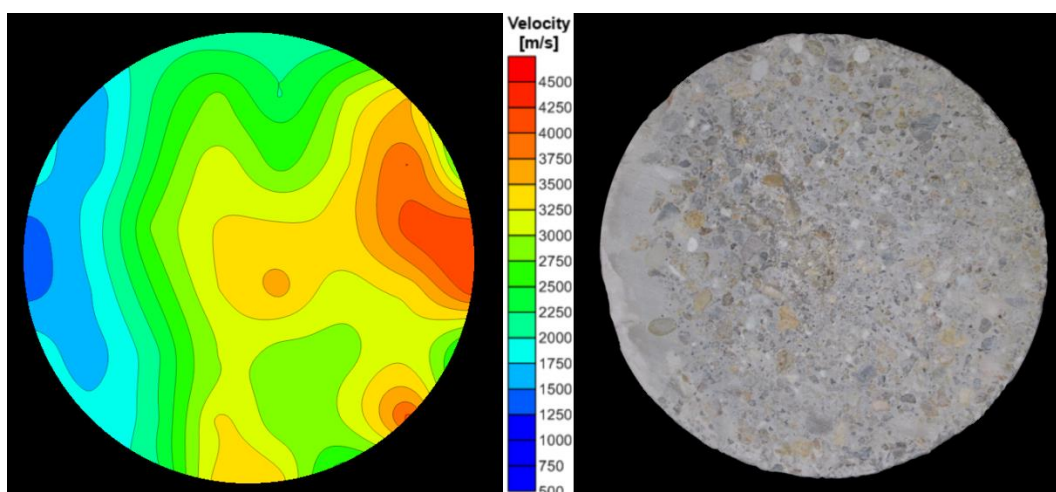


Figura A.17 – $G_0\%$;1bar;60min;40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

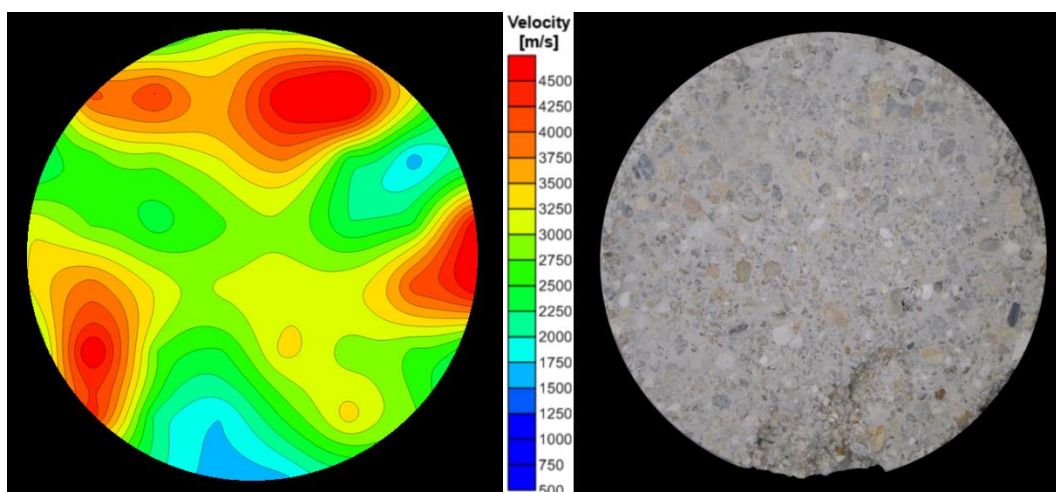


Figura A.18 – $G_0\%$;1bar;60min;40°C: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

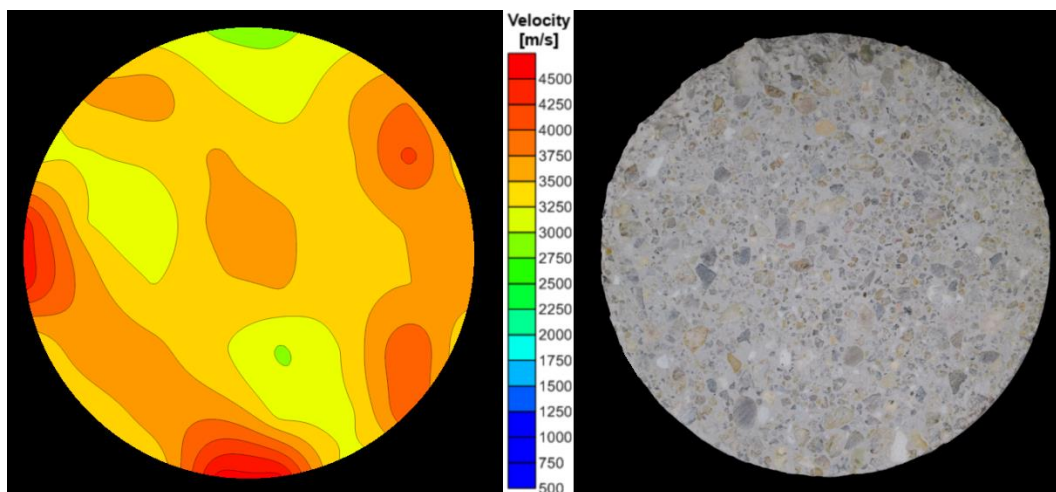


Figura A.19 – $G_{40G/40M/20F;1bar}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia da base da amostra

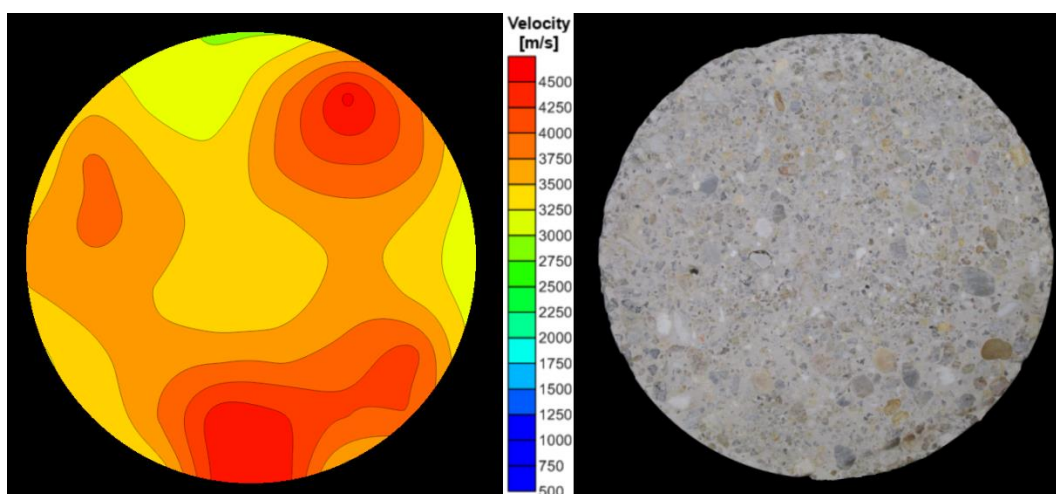


Figura A.20 – $G_{40G/40M/20F;1bar}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do meio da amostra

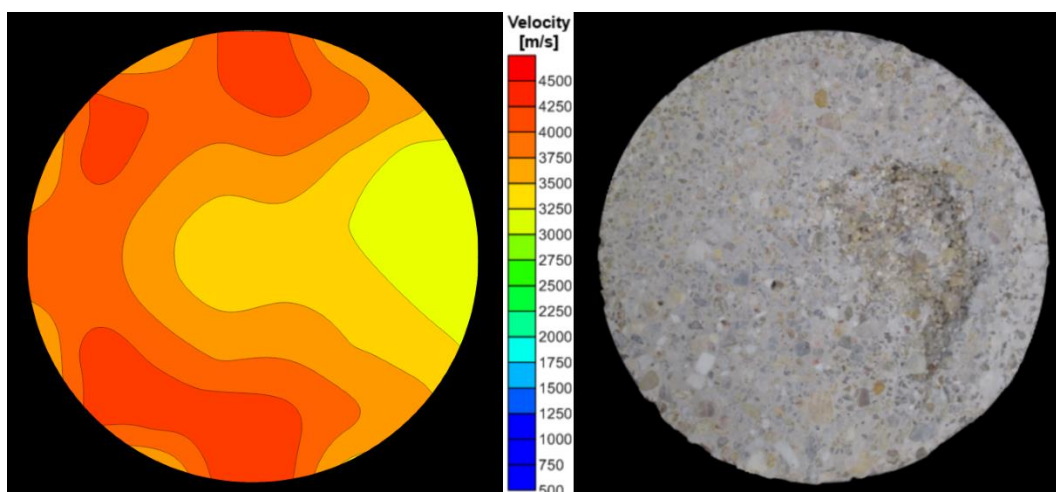


Figura A.21 – $G_{40G/40M/20F;1bar}$: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) da face superior da fatia do topo da amostra